

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta Strojní

Katedra částí a mechanismů strojů

Souřadnicová frézka na dřevo

Coordinate Milling Machine for Wood

Student:

Bc. Jan Havelka

Vedoucí diplomové práce:

doc. Ing. Jiří Havlík, Ph.D.

Ostrava 2013

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Jan Havelka**
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3909T001 Konstrukční a procesní inženýrství
Specializace: 40 Konstrukce strojních dílů a skupin
Téma: **Souřadnicová frézka na dřevo**
Coordinate Milling Machine for Wood

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce navrhnete souřadnicovou frézku na dřevo:

1. Jako pohon fréz použít brusku NAREX SGP 30-8 E
 2. Souřadnicové posuvy budou ruční
 3. Maximální rozměry obrobku 300x300x300 mm
 4. Natáčení brusky kolem horizontální osy 180°
 5. Otáčky upínacího stolu kolem vertikální osy 30 min-1, výkon elektropohonu 1,5 kW
- Konstrukční dokumentace bude obsahovat sestavný výkres a výrobní výkresy určených dílů.

Seznam doporučené odborné literatury:

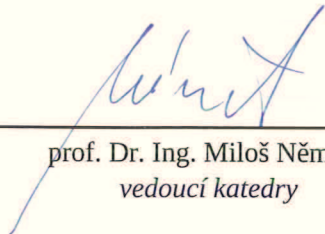
- BOLEK, A.; KOCHMAN, J. *Části strojů 1*. Praha : SNTL, 1990. 775s. ISBN 80-03-00046-7.
BOLEK, A.; KOCHMAN, J. *Části strojů 2*. Praha : SNTL, 1990. 707s. ISBN 80-03-00426-8.
DEJL, Z. *Konstrukce strojů a zařízení I*. Ostrava : Montanex, 2000, 225 s. ISBN 80-7225-018-3
DRASTÍK, F. *Strojnické tabulky*. Ostrava : Montanex, 1999, 722 s. ISBN 80-85780-95-X
KŘÍŽ, R. *Strojnické tabulky II. Pohony*. Ostrava : Montanex, 1997, 213 s. ISBN 80-85780-51-8
MORAVEC, V.; HAVLÍK, J. *Výpočty a konstrukce strojních dílů*. Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2005, 72 s. ISBN 80-248-0878-1
NĚMČEK, M. *Řešené příklady z částí a mechanismů strojů, spoje*.
druhé vydání Ostrava : VŠB-TU Ostrava, 2008, 111 s. ISBN 978-80-248-1782-8
Katalogy ložisek
Firemní literatura

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

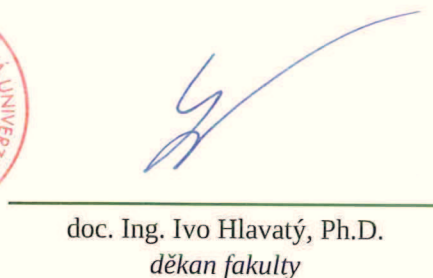
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Jiří Havlík, Ph.D.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



prof. Dr. Ing. Miloš Němček
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 16.5.2013...

Jan Holík

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby

V Ostravě : 16.5.2013

Jan Havelka

podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Bc. Jan Havelka

Adresa trvalého pobytu studenta:

Lípy 323

Čechy pod Kosířem

798 58

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

HAVELKA, J. *Souřadnicová frézka na dřevo : diplomová práce*. Ostrava : VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra částí a mechanismů strojů, 2013, 60 s. Vedoucí práce: doc. Ing. Jiří Havlík, Ph.D.

Diplomová práce je zaměřena na konstrukční návrh souřadnicové frézky na dřevo. V jednotlivých kapitolách práce je postupně uveden přehled současného stavu techniky pro frézování dřeva, popis navržené konstrukce, stanovení řezných podmínek při obrábění dvou druhů dřeva, silový rozbor, pevnostní výpočty zvolených částí a cenový odhad materiálu navržené konstrukce.

ANOTATION OF MASTER THESIS

HAVELKA, J. *Coordinate Milling Machine for Wood : Master Thesis*. Ostrava : VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Machine parts and Mechanisms, 2013, 60 p. Thesis Head: doc. Ing. Jiří Havlík, Ph.D.

This thesis is aimed at engineering design of coordinate milling machine for wood. In individual chapters of this thesis is gradually introduced summary of actual technology for woodcutting, description of designed construction, specification of cutting conditions of milling two types of wood, load analysis, strength calculations and price estimation of material for designed construction.

OBSAH

SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ	9
1 ÚVOD	15
2 CÍLE PRÁCE	16
3 PŘEHLED TECHNIKY PRO FRÉZOVÁNÍ DŘEVA	17
3.1 Frézky na dřevo	17
3.1.1 Dlabačky	17
3.1.2 Spodní frézky	18
3.1.3 Tloušťkovací frézky	18
3.1.4 Srovnávací frézky	19
3.1.5 Kombinované frézky	19
3.1.6 CNC frézky	20
3.2 Frézy do dřeva	20
3.2.1 Frézy stopkové	20
3.2.2 Frézy nástrčné	21
4 POPIS NAVRŽENÉ KONSTRUKCE	23
5 STANOVENÍ ŘEZNÝCH PODMÍNEK	26
6 SILOVÝ ROZBOR	30
6.1 Frézování do strany	30
6.2 Frézování směrem dozadu	31
6.3 Působení řezných sil na hřídel pracovního stolu	31
6.4 Zdvihání osy z	32
7 NÁVRH A KONTROLA NAVRŽENÝCH DÍLŮ	33
7.1 Kontrola profilu osy z na ohyb	33
7.2 kontrola profilu osy y	34
7.3 Pevnostní kontrola hřídele otočného stolu	36
7.3.1 Výpočet reakcí na hřídeli v rovině x-z	36
7.3.2 výpočet reakcí v rovině y-z	38
7.3.3 Statická kontrola hřídele	41
7.4 Pevnostní kontrola těsného pera	43
7.5 Kontrola pojezdového vozíku osy x	44
7.5.1 Frézování do strany	45
7.5.2 Frézování směrem dozadu	46
7.5 Pevnostní kontrola rukojeti	47
7.6 Návrh svěrného spoje brusky	49

7.6.1 Kontrola částí svěrného spoje na měrný tlak	51
7.6.2 Pevnostní kontrola šroubu	51
7.7 Návrh a kontrola třecího spoje držáku brusky	52
7.8 Pohon otočného stolu	54
8 CENOVÝ ODHAD	55
9 ZÁVĚR	57
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	58
SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE	59
PODĚKOVÁNÍ	59
SEZNAM PŘÍLOH	60

SEZNAM POUŽITÉHO OZNAČENÍ

a	Délka	[mm]
a _r	Délka ramena osově síly ve šroubu svěrného spoje vřetena	[mm]
b	Délka	[mm]
b _p	Šířka těsného pera	[mm]
b _r	Délka ramena osově síly ve šroubu svěrného spoje vřetena	[mm]
b _{sp}	Šířka stykové plochy rukojeti a držáku vřetena	[mm]
c	Délka	[mm]
d	Průměr	[mm]
d ₂	Střední průměr závitu	[mm]
d ₃	Malý průměr závitu	[mm]
d _{AA}	Průměr hřídele v průřezu A-A	[mm]
d _{BB}	Průměr hřídele v průřezu B-B	[mm]
d _h	Průměr hřídele	[mm]
d _n	Průměr nástroje	[mm]
d _{ruc}	Průměr tyče rukojeti	[mm]
d _s	Průměr objímky svěrného spoje vřetena	[mm]
d _{sr}	Průměr šroubu	[mm]
f _{ao}	Součinitel tření mezi ocelí a hliníkem	[-]
f _o	Součinitel tření ocel na ocel	[-]
f _z	Součinitel tření v závitu	[-]
g	Gravitační zrychlení	[m·s ⁻²]
i	Počet třecích ploch	[-]
i _p	převodový poměr šnekové převodovky	[-]
k _{ao}	Součinitel bezpečnosti proti prokluzu svěrného spoje vřetena	[-]
k _f	Součinitel korekce frézovaného průřezu	[-]
k _{pp}	Součinitel bezpečnosti těsného pera proti otlacení	[-]
k _{sAA}	Součinitel statické bezpečnosti hřídele v průřezu A-A	[-]
k _{sBB}	Součinitel statické bezpečnosti hřídele v průřezu B-B	[-]

k_{sM8}	Součinitel statické bezpečnosti šroubu M8	[-]
k_{sOZ}	Součinitel statické bezpečnosti profilu osy z v ohybu	[-]
k_{sruc}	Součinitel statické bezpečnosti rukojeti v ohybu	[-]
k_{Tp}	Součinitel statické bezpečnosti těsného pera ve střihu	[-]
l_a	Rameno působící axiální řezné síly na profil osy z	[mm]
l_{ay}	Rameno působící axiální řezné síly na profil osy y	[mm]
l_{Fr}	Rameno působící radiální řezné síly na hřídel otočného stolu	[mm]
l_p	Délka těsného pera	[mm]
l_r	Šířka objímky svěrného spoje vřetena	[mm]
l_{rd}	Rameno působící síly od zvedání osy z na šroubový spoj	[mm]
l_{ruc}	Rameno působící síly od zvedání osy z na průřez A-A rukojeti	[mm]
l_t	Rameno působící radiální řezné síly na třecí spoj držáku vřetena	[mm]
l_y	Délka profilu osy y mezi pojezdovými vozíky	[mm]
l_z	Rameno působící radiální řezné síly na profil osy z	[mm]
l_{zy}	Rameno působící radiální řezné síly na profil osy y	[mm]
m_z	Hmotnost osy z	[kg]
n	Otáčky vřetena	[min ⁻¹]
n_1	Otáčky elektromotoru	[min ⁻¹]
p	Řezný odpor	[MPa]
p_2	Tlak v drážce náboje na stěnu bok pera	[MPa]
p_{D2}	Dovolený tlak v drážce náboje na bok těsného pera	[MPa]
p_{DAI}	Dovolený tlak hliníku	[MPa]
p_{Do}	Dovolený tlak oceli	[MPa]
p_s	Tlak ve svěrném spoji vřetena	[MPa]
p_{sp}	Tlak ve stykové ploše třecího spoje držáku vřetena	[MPa]
r_{Fa}	Rameno axiální řezné síly na hřídel otočného stolu	[mm]
s_k	Rozměr klíče pro šestihrannou hlavu šroubu	[mm]
s_{min}	Posuv za minutu	[mm·min ⁻¹]
s_z	Posuv na zub	[mm]

t	Hloubka třísky	[mm]
t_1	Hloubka drážky pro pero v náboji	[mm]
v_f	Řezná rychlost	[m·min ⁻¹]
x_s	Vzdálenost středu ložiska od kraje osazení hřídele	[mm]
y_{fr}	Posunutí nástroje od deformace profilů souřadnicových os	[mm]
y_{OFa}	Průhyb osy y způsobený axiální řeznou silou	[mm]
y_{OFr}	Průhyb osy y způsobený radiální řeznou silou	[mm]
y_{Oz}	Průhyb osy z	[mm]
z	Počet zubů frézy	[mm]
D_{1t}	Vnější průměr částí třecího spoje	[mm]
D_2	Vnitřní průměr podložky	[mm]
D_{2t}	Vnitřní průměr částí třecího spoje	[mm]
E_{Al}	Modul pružnosti hliníku v tahu	[MPa]
F_a	Axiální řezná síla	[N]
F_{ab}	Axiální řezná síla při frézování borovice	[N]
F_{ah}	Síla působící na hřídel otočného stolu v axiálním směru	[N]
F_{aj}	Axiální řezná síla při frézování jasanu	[N]
F_{GZ}	Tíhová síla osy z	[N]
F_{ix}	Označení všech sil působících v ose x	[N]
F_{iy}	Označení všech sil působících v ose y	[N]
F_{iz}	Označení všech sil působících v ose z	[N]
F_O	Osová síla ve šroubu svěrného spoje vřetena	[N]
F_O'	Osová síla ve šroubu svěrného spoje vřetena	[N]
F_{Ot}	Osová síla ve šroubu třecího spoje držáku	[N]
F_{p2}	Síla působící na bok těsného pera v drážce náboje	[N]
F_{POSxzA}	Posouvající síla na hřídeli v rovině x-z v místě ložiska A	[N]
F_{POSxzB}	Posouvající síla na hřídeli v rovině x-z v místě ložiska B	[N]
$F_{POSxzph}$	Posouvající síla na počátku hřídele v rovině x-z	[N]
F_{POSyzA}	Posouvající síla na hřídeli v rovině y-z v místě ložiska A	[N]

F_{POSyzB}	Posouvající síla na hřídeli v rovině y-z v místě ložiska B	[N]
$F_{POSyzph}$	Posouvající síla na počátku hřídele v rovině x-z	[N]
F_{ps}	Síla namáhající těsné pero na střih	[N]
F_r	Radiální řezná síla	[N]
F_{rh}	Síla působící na hřídel otočného stolu v radiálním směru	[N]
F_{ruk}	Síla působící na rukojeť při manipulaci	[N]
F_z	Obvodová řezná síla	[N]
F_{zh}	Síla působící točivý moment na hřídeli otočného stolu	[N]
F_{zmax}	Maximální obvodová řezná síla	[N]
G_A	Modul pružnosti hliníku ve smyku	[MPa]
I	Plošný moment setrvačnosti	[cm ⁴]
I_t	Moment tuhosti v krutu	[cm ⁴]
K_A	Součinitel vnějších dynamických sil	[-]
M_{iB}	Označení všech momentů vztahujících se k ložisku B	[N·mm]
M_{lt}	Moment působící na třecí spoj držáku	[N·mm]
M_{OA}	Ohybový moment v místě ložiska A	[N·mm]
M_{OAA}	Ohybový moment na hřídeli v průřezu A-A	[N·mm]
M_{OAAxz}	Ohybový moment na hřídeli v průřezu A-A v rovině x-z	[N·mm]
M_{OAAyz}	Ohybový moment na hřídeli v průřezu A-A v rovině y-z	[N·mm]
M_{OB}	Ohybový moment v místě ložiska B	[N·mm]
M_{OFa}	Ohybový moment od axiální řezné síly na profilu osy y	[N·mm]
M_{OFr}	Ohybový moment od radiální řezné síly na profilu osy y	[N·mm]
M_{OFrx}	Ohybový moment od radiální řezné síly na profilu osy y	[N·mm]
M_{Oph}	Ohybový moment na počátku hřídele otočného stolu	[N·mm]
M_{ORAA}	Ohybový moment na rukojeti v průřezu A-A	[N·mm]
M_{OY}	Ohybový moment na profilu osy y	[N·mm]
M_{OZ}	Ohybový moment na profilu osy z	[N·mm]
M_{TM}	Moment tření pod maticí	[N·mm]
M_{TZ}	Moment tření v závitu	[N·mm]

M_{UT}	Utahovací moment šroubu	[N·mm]
M_x	Dovolený moment pojezdového vozíku kolem osy x	[N·mm]
M_y	Dovolený moment pojezdového vozíku kolem osy y	[N·mm]
M_z	Dovolený moment pojezdového vozíku kolem osy z	[N·mm]
N_{rd}	Normálová přitlačná síla ve svěrném spoji vřetena	[N]
N_{rds}	Normálová přitlačná síla ve svěrném spoji vřetena	[N]
P	Stoupání závitu	[mm]
P_1	Výkon elektromotoru	[kW]
P_B	Příkon brusky	[W]
$P_{už}$	Užitečný výkon brusky	[W]
R_A	Reakce v ložisku A	[N]
R_{Bx}	Reakce v ložisku B v ose x	[N]
R_{By}	Reakce v ložisku B v ose y	[N]
R_{Cx}	Reakce v ložisku C v ose x	[N]
R_{Cy}	Reakce v ložisku C v ose y	[N]
R_{e11343}	Mez kluzu oceli 11 343	[MPa]
R_{e11500}	Mez kluzu oceli 11 500	[MPa]
R_{e11523}	Mez kluzu oceli 11 523	[MPa]
$R_{e12.9}$	Mez kluzu materiálu pevnostní třídy 12.9	[MPa]
$R_{e5.6}$	Mez kluzu materiálu pevnostní třídy 5.6	[MPa]
R_{m11500}	Mez pevnosti oceli 11 500	[MPa]
$R_{p0,2Al}$	Smluvní mez kluzu hliníku	[MPa]
R_{Tlt}	Třecí poloměr třecího spoje držáku	[mm]
R_{Truk}	Třecí poloměr pro svěrný spoj vřetena	[mm]
T_{Fr}	Točivý moment v profilu osy y od radiální řezné síly	[N·mm]
T_h	Točivý moment na hřídeli otočného stolu	[N·mm]
T_{hAA}	Točivý moment na hřídeli otočného stolu v průřezu A-A	[N·mm]
T_{hBB}	Točivý moment na hřídeli otočného stolu v průřezu B-B	[N·mm]
T_{rd}	Točivý moment od brusky působící na svěrný spoj vřetena	[N·mm]

$W_{40 \times 40}$	Modul průřezu profilu 40x40 v ohybu	[cm ³]
$W_{80 \times 80}$	Modul průřezu profilu 80x80 v ohybu	[cm ³]
α_{σ}	Součinitel vrubové citlivosti pro normálové napětí	[-]
$\alpha_{\sigma AA}$	Součinitel vrubové citlivosti pro normálové napětí v průřezu A-A	[-]
α_{τ}	Součinitel vrubové citlivosti pro smykové napětí	[-]
$\alpha_{\tau AA}$	Součinitel vrubové citlivosti pro smykové napětí v průřezu A-A	[-]
$\alpha_{\tau BB}$	Součinitel vrubové citlivosti pro smykové napětí v průřezu B-B	[-]
η_B	Účinnost brusky	[-]
ϑ	Úhel zkrutu osy y	[°]
λ	Úhel sklonu hlavního ostří frézy	[°]
π	Ludolfovo číslo	[-]
σ_{OAA}	Ohybové napětí na hřídeli v průřezu A-A	[MPa]
σ_{ORAA}	Ohybové napětí na rukojeti v průřezu A-A	[MPa]
σ_{OY}	Ohybové napětí na profilu osy y	[MPa]
σ_{OZ}	Ohybové napětí na profilu osy y	[MPa]
σ_{pt}	Mez pevnosti dřeva v tahu ve směru vláken	[MPa]
σ_{redAA}	Redukované napětí na hřídeli v průřezu A-A	[MPa]
σ_{redM8}	Redukované napětí na šroubu	[MPa]
σ_t	Napětí v tahu ve šroubu	[MPa]
τ_{AA}	Napětí v krutu na hřídeli v průřezu A-A	[MPa]
τ_{BB}	Napětí v krutu na hřídeli v průřezu B-B	[MPa]
τ_{Ds}	Dovolené napětí těsného pera ve stříhu	[MPa]
τ_k	Napětí v krutu na šroubu	[MPa]
τ_{sp}	Napětí těsného pera ve stříhu	[MPa]
τ_Y	Napětí v krutu profilu osy y	[MPa]
φ'	Redukovaný třecí úhel	[°]
ψ	Úhel stoupání závitu	[°]

1 ÚVOD

Strojů pro frézování dřeva je dnes na trhu nepřehledné množství různých druhů, počínaje malými přístroji určenými pro jednoduché obráběcí práce až po číslicově řízená obráběcí centra určená k víceosému 3D frézování. Pro některé malé firmy se finančně nevyplatí pořízení drahého CNC stroje a tak se výroba dílů protahuje přenosem mezi jednoúčelovými stroji. Dokončování tvarové složitějších dílů, u kterých není požadovaná vysoká přesnost se provádí ručně. Příkladem mohou být nožky od křesel, která mají složitý tvar a jejich dokončování se provádí za pomoci řezbářského náradí.

V diplomové práci řeším finančně dostupný víceosý stroj, který by umožnil zvýšit efektivitu právě těch dokončovacích prací, u kterých nejsou velké nároky na přesnost a to nahrazením zdoluhavých ručních prací částečně strojním řešením tak, že jsem zkombinoval princip ruční horní frézky, který jsem doplnil o možnost frézování v prostoru vedením, které zajišťuje dostatečnou oporu rukám pracovníka.

2 CÍLE PRÁCE

- Provést průzkum současného stavu techniky pro obrábění dřeva
- Vytvořit konstrukční návrh dle zadání
- Stanovit silový rozbor navrženého řešení
- Provést pevnostní kontrolu důležitých dílů
- Stanovit cenový odhad

3 PŘEHLED TECHNIKY PRO FRÉZOVÁNÍ DŘEVA

V současné době je na trhu nepřeberné množství frézek a nástrojů pro obrábění dřeva. Obecně lze stroje i nástroje rozdělit do několika skupin podle typu konstrukce.

3.1 Frézky na dřevo

3.1.1 Dlabáčky

Dlabáčky jsou frézky sloužící k frézování drážek pro čepy a k vrtání otvorů. Tyto frézky se používají převážně ve stolárnách. Princip stroje je, že nástroj má vodorovnou osu, kolem které rotuje. Obrobek je upnutý na stole, který se pohybuje a zajišťuje tak posuv do řezu. Příklad dlabáčky je na Obr. 3.1.



Obr. 3.1 – dlabáčka [11]

3.1.2 Spodní frézky

Spodní frézky převážně slouží k frézování průchozích drážek, vybrání a různých profilů buď drážkovými, nebo tvarovými frézami. Osa rotace frézy je svislá a nástroj prochází zespodu skrze otvor v pracovním stole. Posuv do řezu je realizován ručně. Spodní frézka je na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 – spodní frézka [12]

3.1.3 Tloušťkovací frézky

Tyto frézky se používají pro obrábění hranolů a desek. Osa rotace nástroje je vodorovná a frézování se provádí válcovou částí frézy, přičemž obrobek je pod nástrojem. Takto se dosahuje rovného povrchu a žádané tloušťky obrobku. Tloušťkovací frézka je zobrazena na Obr. 3.3.



Obr. 3.3 – tloušťkovací frézka [11]

3.1.4 Srovnávací frézky

Principem jsou srovnávací frézky podobné frézám tloušťkovacím, přičemž nástroj obrábí materiál, který se ručně posunuje po pracovním stole. Obrábění probíhá ze spodní strany. Takto se srovnávají hrany a plochy obrobků. Srovnávací a tloušťkovací frézky se také někdy nazývají hoblovky a nástroj hoblovací válec. Příklad srovnávací frézky je na Obr. 3.4 .



Obr. 3.4 – srovnávací frézka [11]

3.1.5 Kombinované frézky

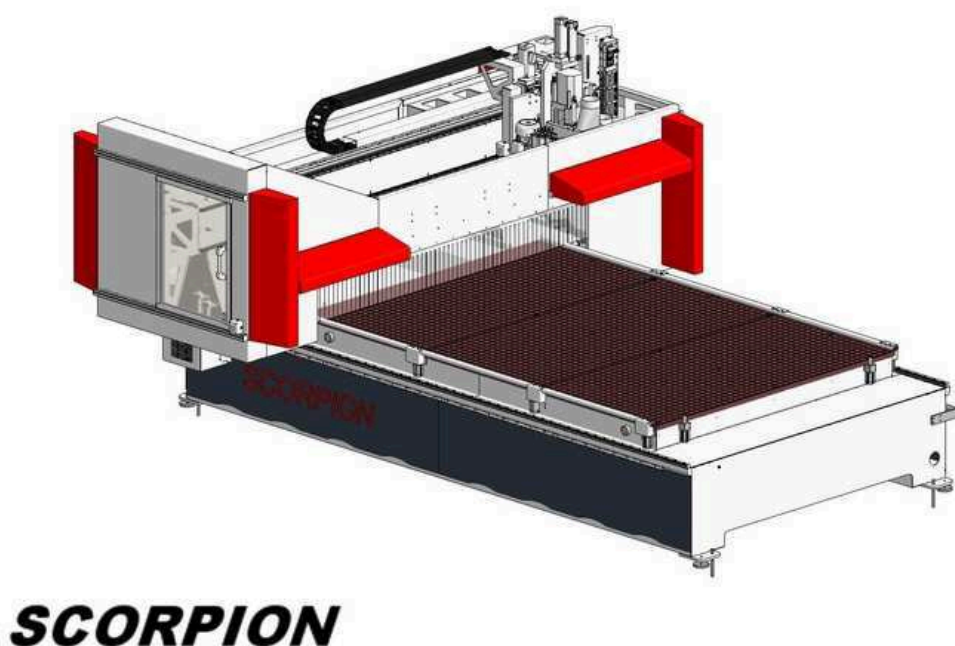
Spojují více výše uvedených typů a umožňují tak větší rozsah prací. Na Obr. 3.5 je kombinovaná frézka společnosti Houfek [11], která spojuje funkci tloušťkovací a srovnávací frézky.



Obr. 3.5 – kombinovaná frézka [11]

3.1.6 CNC frézky

CNC frézky jsou převážně řešeny jako portálové stroje, s konstrukcí zcela odlišnou od výše uvedených příkladů. Spíše vycházejí z konstrukcí strojů pro obrábění kovů, přičemž nejsou tak robustní, protože síly vzniklé při frézování dřeva nedosahují takových velikostí jako při obrábění kovu. Nástroj má svislou osu rotace. Posuvy do řezu vykonává jak stůl s obrobkem, tak nástroj. Frézování se realizuje z horní nebo boční strany, kdy lze použít stopkové i nástrčné nástroje. Na Obr. 3.6 je zobrazena CNC portálová frézka.



Obr. 3.6 – portálová CNC frézka [11]

3.2 Frézy do dřeva

3.2.1 Frézy stopkové

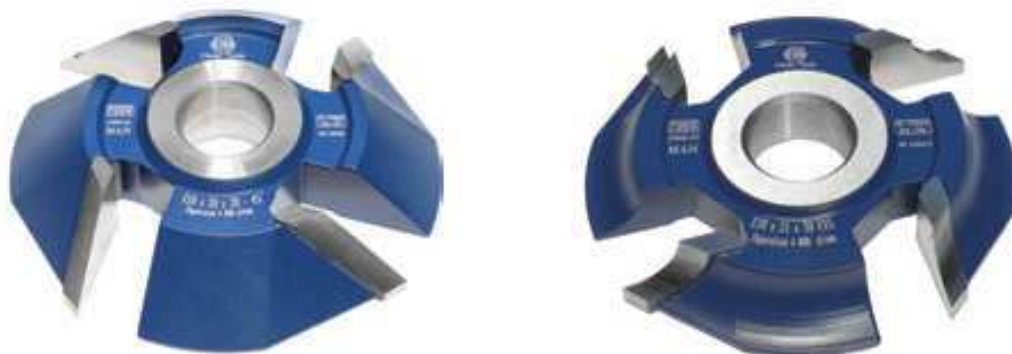
Stopkové frézy mají břity vyfrézovány nebo napájeny přímo na dřívku, za který se upínají do vřetena stroje. Mohou být určené k frézování pravoúhlých i tvarových drážek, vybrání a zkosení. Některé typy umožňují nasazení kopírovacího ložiska, které se nasazuje buď pod břity, nebo na válcovou upínací část. Příklady stopkových fréz jsou na Obr. 3.7.



Obr. 3.7 – stopkové frézy [13]

3.2.2 Frézy nástrčné

Nástrčné frézy se nasazují na upínací trn, který se upíná do vřetena stroje. Přenos točivého momentu mezi trnem a nástrojem je třením. Nástrčné frézy se ve většině případů používají k frézování různých drážek, vybrání a zaoblení. Rozdíl mezi stopkovými a nástrčnými frézami je také v tom, že nástrčné frézy mají několikanásobně větší průměr. Příklady nástrčných fréz jsou na Obr. 3.8.



Obr. 3.8 – příklady nástrčných fréz [13]

Zvláštním typem nástrčných fréz jsou hoblovací válce používané na tloušťkovacích a srovnávacích frézách. Hoblovací válec je spolu s drážkovací frézou zobrazen na Obr. 3.9.

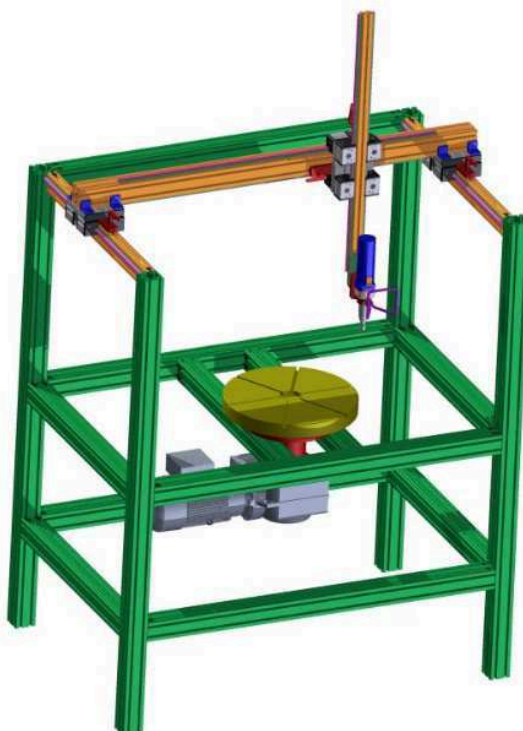


Obr. 3.9 – hoblovací válec a drážkovací fréza [13]

4 POPIS NAVRŽENÉ KONSTRUKCE

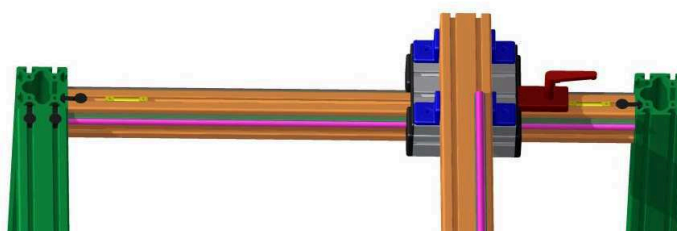
Rám frézky jsem navrhl z hliníkových profilů řady 8 a jejich příslušenství od firmy Item [9]. Hliníkový stavebnicový systém jsem použil z důvodu jednoduchosti montáže a velkého počtu možností, s jakými lze pomocí těchto profilů konstruovat.

Frézka má 5 os, přičemž 4 z nich jsou ovládány ručně, a to podélná osa x, příčná osa y, svislá osa z a otočná osa vřeten v horizontálním směru a. Pouze svislá osa otočného stolu c je poháněna elektromotorem se šnekovou převodovkou. Celá frézka je na Obr. 4.1.



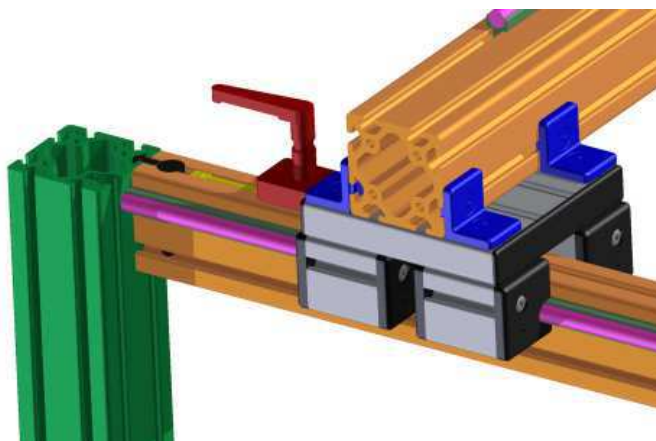
Obr. 4.1 – souřadnicová frézka na dřevo

Profily nosné konstrukce jsou k sobě připojeny univerzálními spoji [9]. Výjimku tvoří připojení profilu osy y k pojezdovému vozíku osy x, kde je tento profil připojen pomocí svěrných úhelníků [9]. Všechny spoje profilů jsou znázorněny na Obr. 4.2.



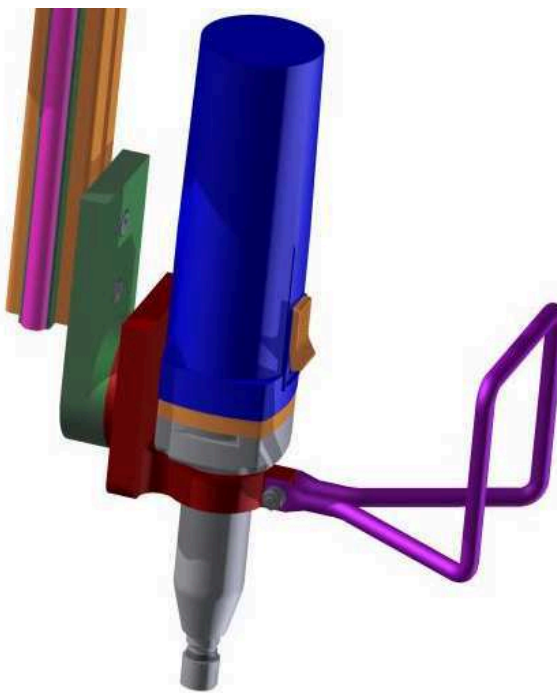
Obr. 4.2 – spojení profilů

Pojezdy jednotlivých os jsem navrhl pomocí modulárního kladkového vedení [9], které se skládá z pojezdového vozíku, jenž se po kladkách valivě posunuje po kalených tyčích zalisovaných v pouzdrech v drážkách profilu. K vozíku je přišroubována zarážka [9], která zajišťuje upnutí vozíku při požadavku, aby se daná osa nepohybovala. Z jedné strany též zajišťuje funkci dorazu, na opačné straně vozíku je pak přišroubován doraz [9]. Příkladem je pojezdový vozík osy x, znázorněný na Obr. 4.3.



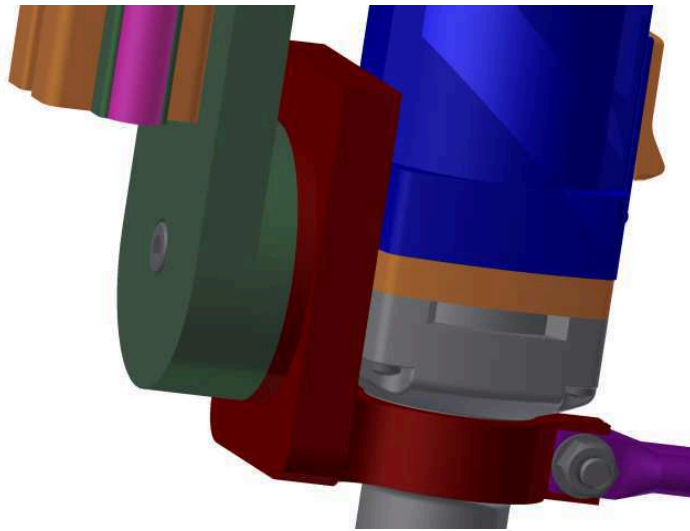
Obr. 4.3 – pojezdový vozík osy x

Bruska, která tvoří vřeteno, je uložena v držáku, který je otočný kolem horizontální osy. K držáku brusky je dále přišroubována rukojeť, kterou obsluha stroje realizuje potřebné pohyby při obrábění. Konstrukční uspořádání uložení vřetena je na Obr. 4.4.



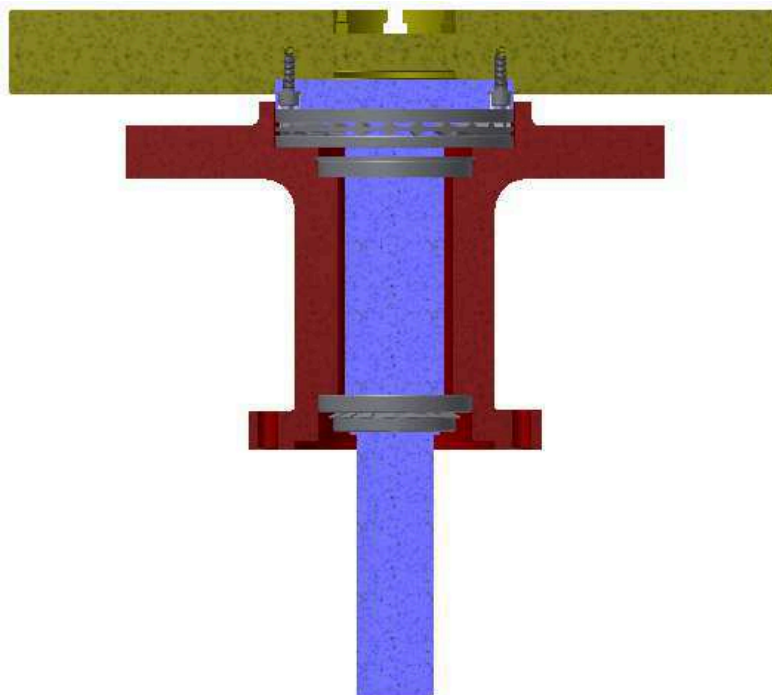
Obr. 4.4 – vřeteno

K zajištění nastavení požadovaného úhlu natočení horizontální osy je v držáku brusky otvor se závitem, přes který šroubem přitahuje k mezikusu. Velikost úhlu natočení lze pak odečíst ze stupnice. Detail třecího spoje je na Obr. 4.5.



Obr. 4.5 – třecí spojení osy a

Hřídel otočného stolu je uložena v těle na dvou kuličkových ložiskách a je přišroubována k upínací desce stolu. Axiální zatížení přenáší válečkové axiální ložisko. K tělu je na spodní části přišroubovaná převodovka s motorem a dutou hřídelí, do které zapadá hřídel stolu. Přenos točivého momentu je realizován těsným perem. Na Obr. 4.6 je znázorněno uložení hřídele v těle.



Obr. 4.6 – uložení hřídele

5 STANOVENÍ ŘEZNÝCH PODMÍNEK

Výchozím faktorem určujícím zatížení celé konstrukce stroje jsou síly vznikající při frézování. Jelikož na tyto síly má značný vliv řezný odpor obráběného materiálu, který je určen pevností dřeva, vybral jsem dle [19] z měkkých a tvrdých dřev po jednom druhu s největší pevností a následně jsem dle [18] vypočítal hodnotu řezného odporu. Hodnoty jsem zapsal do Tab. 5.1. Ve výpočtech jsem uvažoval vždy nejvyšší hodnotu řezného odporu pro daný druh dřeva.

Řezný odpor

$$p = (4 \div 5) \cdot \sigma_{pt}$$

Příkon brusky, která slouží jako vřeteno je 740W [10], z této hodnoty jsem vypočítal dle [1] užitečný výkon, který je bruska schopna pro obrábění poskytnout.

$$P_{už} = \frac{P_B}{\eta_B} = \frac{740}{0,7} = 518W \quad (5.1)$$

Z užitečného výkonu a doporučené řezné rychlosti dle [14] jsem vypočítal maximální velikost obvodové řezné síly pro měkké a tvrdé dřevo. Hodnoty jsem zapsal do Tab. 5.1.

$$F_{zmax} = \frac{P_{už}}{v_f} \quad (5.2)$$

Tab. 5.1 – určení maximální obvodové řezné síly

druh dřeva	mez pevnosti v tahu σ_{pt} [MPa]	řezný odpor p [MPa]	řezná rychlost v_f [m·min ⁻¹]	max. obvodová řezná síla F_{zmax} [N]
Jasan	145	580 - 725	400	77,7
Borovice	103	412 - 515	600	51,8

Bruska umožňuje rozmezí otáček 13 000 – 31 000 min⁻¹[10]. Z výše uvedených řezných rychlostí a otáček brusky jsem vypočítal rozmezí průměrů fréz. Hodnoty jsem zapsal do Tab. 5.2.

Řezná rychlost

$$v_f = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (5.3)$$

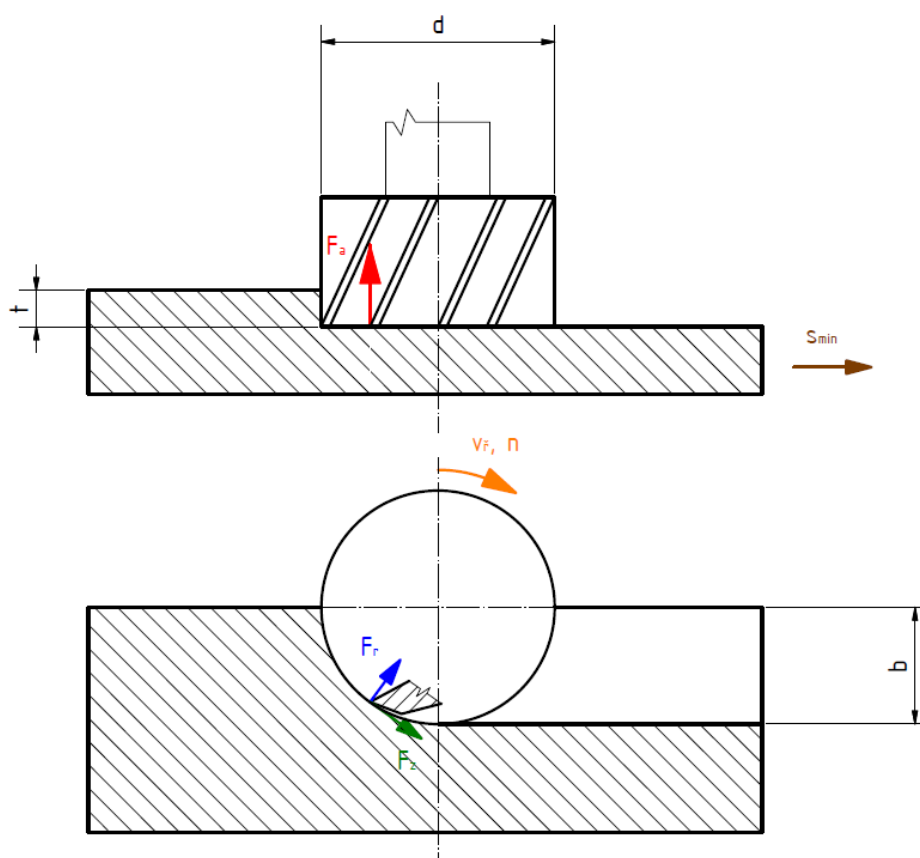
Průměr frézy

$$d = \frac{1000 \cdot v_f}{\pi \cdot n} \quad (5.4)$$

Tab. 5.2 – rozsah průměrů nástrojů pro obrábění různých druhů dřev

Dřevo	Min. průměr nástroje [mm]	Max. průměr nástroje [mm]
Borovice	6,16	14,69
Jasan	4,11	9,79

Ze stránek [15] jsem vybral dvoubřité čelní drážkovací frézy s průměry 6, 8, 10 a 14mm a přiřadil jsem k nim dle [14] doporučené velikosti posuvu na zub. Tyto hodnoty jsem společně s následujícími vypočítanými zapsal do Tab. 5.4. Pomocí vzorců [1] jsem určil dovolené hloubky třísek pro obrábění polovinou průměry frézy, nebo celým průměrem tak, aby byly splněny podmínky nejvyšší obvodové řezné síly. Schéma sil a velikostí třísek při frézování je znázorněno na Obr. 5.1.



Obr. 5.1 – síly vznikající při frézování

Obvodová řezná síla [1]

$$F_z = t \cdot b \cdot k_f \cdot p \quad (5.5)$$

Radiální řezná síla [1]

$$F_r = (0,2 \div 0,5) \cdot F_z$$

Vypočítané velikosti F_r jsem zapsal do Tab. 5.3. Vycházel jsem z maximální obvodové řezné síly a předpokladu $F_r = (0,4) \cdot F_z$

Tab. 5.3 – síly vzniklé při obrábění měkkých a tvrdých dřev

Dřevo	F_z [N]	F_r [N]
Jasan	77,7	31,1
Borovice	51,8	20,7

Axiální řezná síla [1]

$$F_a = F_z \cdot \operatorname{tg} \lambda \quad (5.6)$$

Jelikož použité drážkovací čelní frézy [15] mají břity s úhlem λ 90° a tangenta tohoto úhlu jde k nekonečnu a axiální sílu nelze výpočtem stanovit, předpokládám, že velikost axiální řezné síly bude stejně velká jako velikost obvodové řezné síly.

Axiální řezná síla při frézování jasanu

$$F_{aj} = 77,7N$$

Axiální řezná síla při frézování borovice

$$F_{ab} = 51,8N$$

Součinitel korekce frézovaného průřezu [1]

$$k_f = \frac{s_z \cdot z}{\pi \cdot d} \quad (5.7)$$

Hloubka třísky

$$t = \frac{F_z}{b \cdot k_f \cdot p} \quad (5.8)$$

Tab. 5.4 – stanovení hloubek třísek pro různé průměry nástrojů

Druh dřeva	d [mm]	s _z [mm]	s _{min} [mm·min ⁻¹]	n [min ⁻¹]	b [mm]	F _{zmax} [N]	t [mm]	k _f [-]
Borovice	8	0,05	2387	23873	4	51,8	6,3	0,004 0
					8		3,1	
	10	0,07	2674	19099	5		4,6	0,004 4
					10		2,3	
	14	0,1	2728	13642	7		3,2	0,004 5
					14		1,6	
Jasan	6	0,03	1273	21221	3	77,7	11,2	0,003 2
					6		5,6	
	8	0,05	1592	15915	4		6,7	0,004 0
					8		3,3	

Jelikož je frézka konstruována s ručním pohonem jednotlivých os, s výjimkou svislé rotační osy, kterou otáčí elektromotor, jsou výše uvedené hodnoty posuvu na zub, resp. posuvu za minutu značně předimenzované a nebudou dosaženy, z toho vyplývá, že nebude dosaženo ani maximální obvodové řezné síly.

6 SILOVÝ ROZBOR

Profily jednotlivých os jsou namáhány od radiální síly vzniklé při obrábění, která je v určitých případech namáhá na ohyb nebo krut a zároveň od axiální řezné síly, která je namáhá na ohyb.

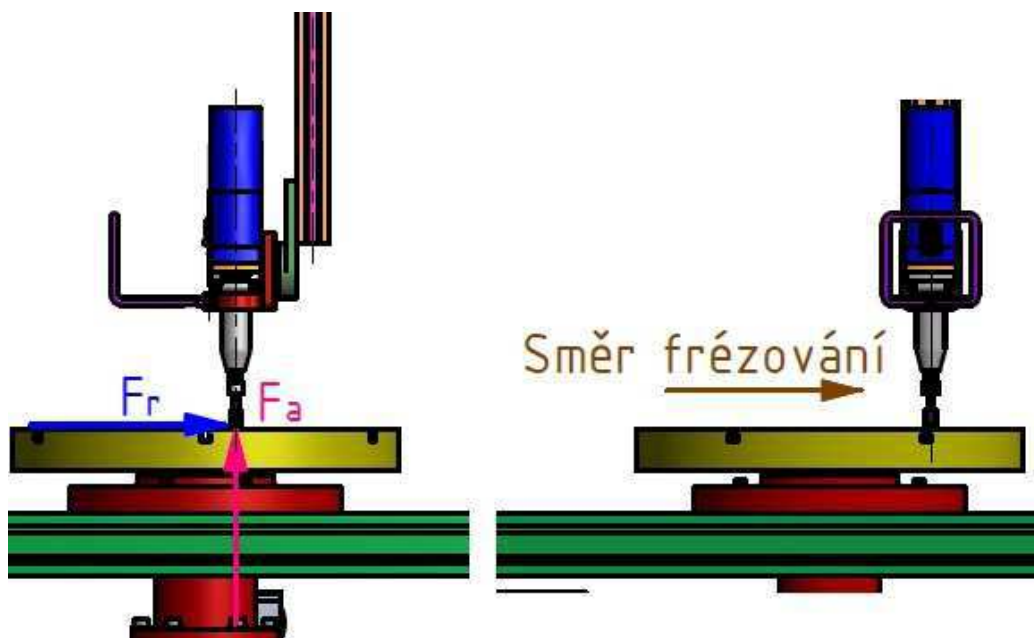
Obvodová řezná síla se projevuje snahou otočit brusku v tělese držáku a také vytváří točivý moment přenášející se přes obrobek do pracovního stolu a dále na jeho hřídel.

Lidská ruka, která zdvihá za držadlo celou hmotnost osy z po dokončeném obrábění toto držadlo namáhá ohybovým momentem. Dále se tento moment snaží překonat třecí moment, který je vyvozen utažením šroubu svěrného spoje zajišťujícího upnutí brusky.

Tyto situace jsem podrobněji popsal v jednotlivých podkapitolách níže s názornými obrázky.

6.1 Frézování do strany

Osa z bude namáhána na ohyb a to nejvíce při obrábění zadní části obrobku těsně nad pracovním stolem ve směru do strany, v případě aretace posuvu osy x. Na profil osy z bude působit radiální síla od obrábění F_r i axiální síla F_a . Silové působení na profil osy z je znázorněn na Obr. 6.1.

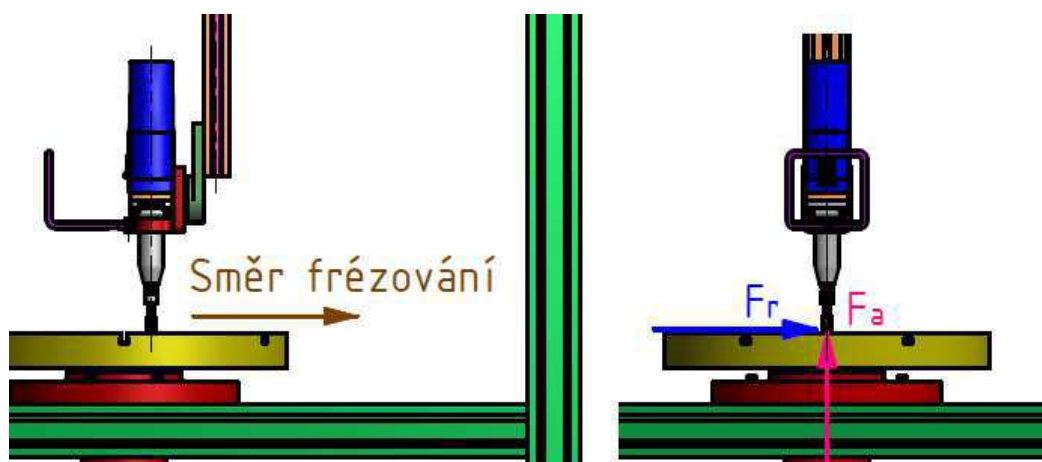


Obr. 6.1 – síly při frézování do strany

Tento způsob frézování bude namáhat také profil osy y na krut a ohyb jelikož síla F_r vytváří na vysunutém rameni osy z točivý moment, proti kterému působí profil osy y a dále síla F_a namáhá ohybem profil osy y skrze aretovaný vozík osy z.

6.2 Frézování směrem dozadu

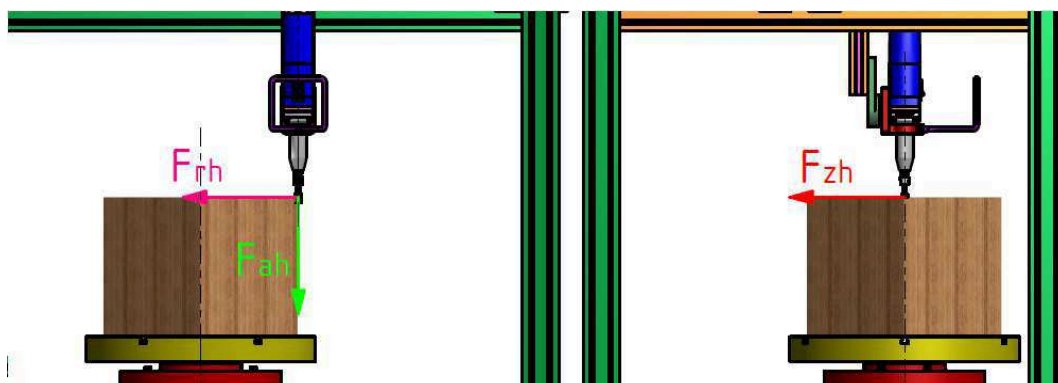
Osa z bude namáhána stejně velkým ohybovým momentem od sil F_r a F_a jako v případě frézování do strany s tím rozdílem že ohybový moment bude působit v rovinách kolmých k předešlému stavu. Změna namáhání se projeví při aretaci osy y tím, že profil této osy nebude namáhán krutem, ale pouze ohybem. Situace je znázorněna na Obr. 6.2.



Obr. 6.2 – síly při frézování směrem dozadu

6.3 Působení řezných sil na hřídel pracovního stolu

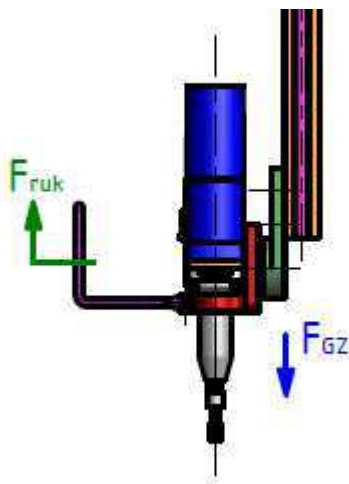
Při obrábění působí řezné síly na hřídel pracovního stolu. Obvodová síla F_{zh} má stejnou velikost a opačný směr jako síla F_z . Tato síla vyvolává v hřídeli točivá a ohybový moment. Síly F_{ah} a F_{rh} namáhají hřídel ohybem a opět jsou opačně orientované se stejnou velikostí jako síly F_a a F_r . Působení sil na hřídel otočného stolu je na Obr. 6.3.



Obr. 6.3 – působení řezných sil na hřídel otočného stolu

6.4 Zdvihání osy z

Po skončení prací je třeba vrátit nástroj mimo obráběcí plochu. Tíhová síla od hmotnosti osy z působí směrem dolů a lidská paže ji přes držadlo překonává a namáhá tak držadlo ohybem, jak je znázorněno na Obr. 6.4.




Obr. 6.4 – síly při zvedání osy z

7 NÁVRH A KONTROLA NAVRŽENÝCH DÍLŮ

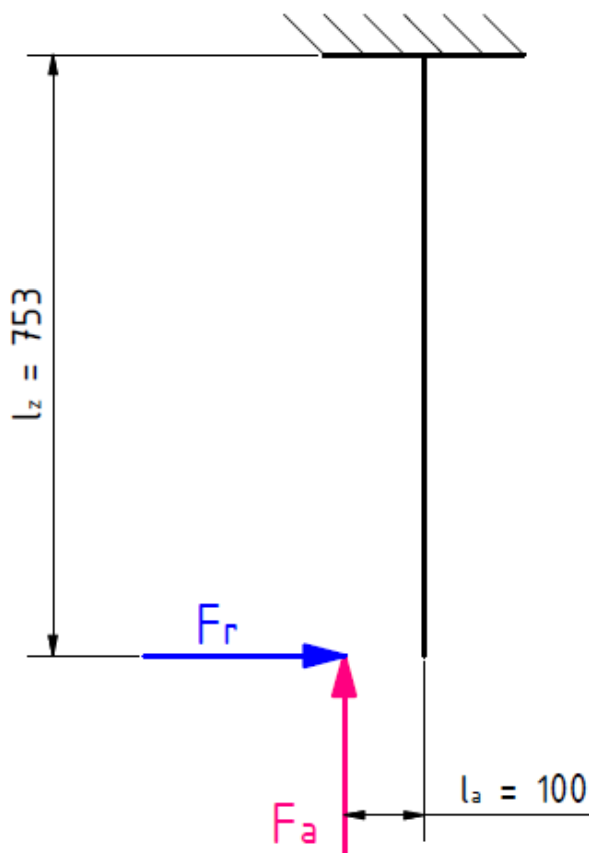
7.1 Kontrola profilu osy z na ohyb

Základním prvkem osy z je profil s rozměry 40x40mm, znázorněný na Obr. 7.1. Tento profil je namáhán ohybem od řezných sil při frézování směrem do strany. Nejvyšší ohybový moment na profil působí při maximálním vyložení. Uvažuji obrábění 5mm nad povrchem stolu.

	Profil 8 40x40
	Al, PÚ: eloxování
$A = 9,16 \text{ cm}^2$	$I = 13,96 \text{ cm}^4$
	$I_t = 1,93 \text{ cm}^4$
$m = 2,47 \text{ kg/m}$	$W = 6,98 \text{ cm}^3$

Obr. 7.1 – rozměry profilu osy z [9]

Pro zjednodušení jsem profil nahradil nosníkem, který je vetknutý v místě, kde je první kladka vozíku osy z. Vetknutí uvažuji z důvodu aretace profilu. Schéma je na Obr. 7.2.



Obr. 7.2 – schéma zatížení profilu osy z

Ohybový moment

$$M_{OZ} = F_r \cdot l_z - F_a \cdot l_a = 31,1 \cdot 753 - 77,7 \cdot 100 = 15648,3 \text{ Nmm} \quad (7.1)$$

Napětí v ohybu

$$\sigma_{OZ} = \frac{M_{OZ}}{W_{40 \times 40}} = \frac{15648,3}{6980} = 2,2 \text{ MPa} \quad (7.2)$$

Statická bezpečnost v ohybu

$$k_{sOZ} = \frac{R_{p0,2Al}}{\sigma_{OZ}} = \frac{195}{2,2} = 88,6 \quad (7.3)$$

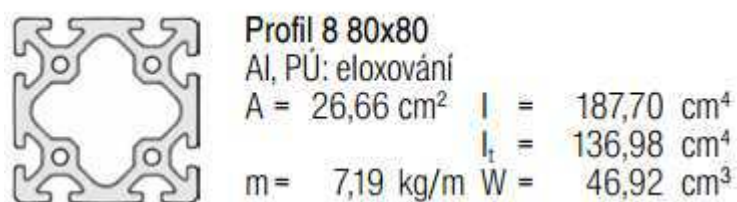
Průhyb osy z

$$y_{OZ} = \frac{F_r \cdot l_z^3}{3 \cdot E_{Al} \cdot I} - \frac{F_a \cdot l_a \cdot l_z^2}{2 \cdot E_{Al} \cdot I} = \quad (7.4)$$

$$= \frac{31,1 \cdot 753^3}{3 \cdot 70000 \cdot 13,96 \cdot 10^4} - \frac{77,7 \cdot 100 \cdot 753^2}{2 \cdot 70000 \cdot 13,96 \cdot 10^4} = 0,2 \text{ mm}$$

7.2 kontrola profilu osy y

Profil s rozměry 80x80 tvořící základ osy y znázorněný na Obr. 7.3 [9] je namáhán krutem a ohybem od sil F_r a F_a , které působí na rameni l_{zy} , resp. l_{ay} . Délka profilu je mezi vozíky osy x $l_y = 1280 \text{ mm}$.



Obr. 7.3 – rozměry profilu osy y[9]

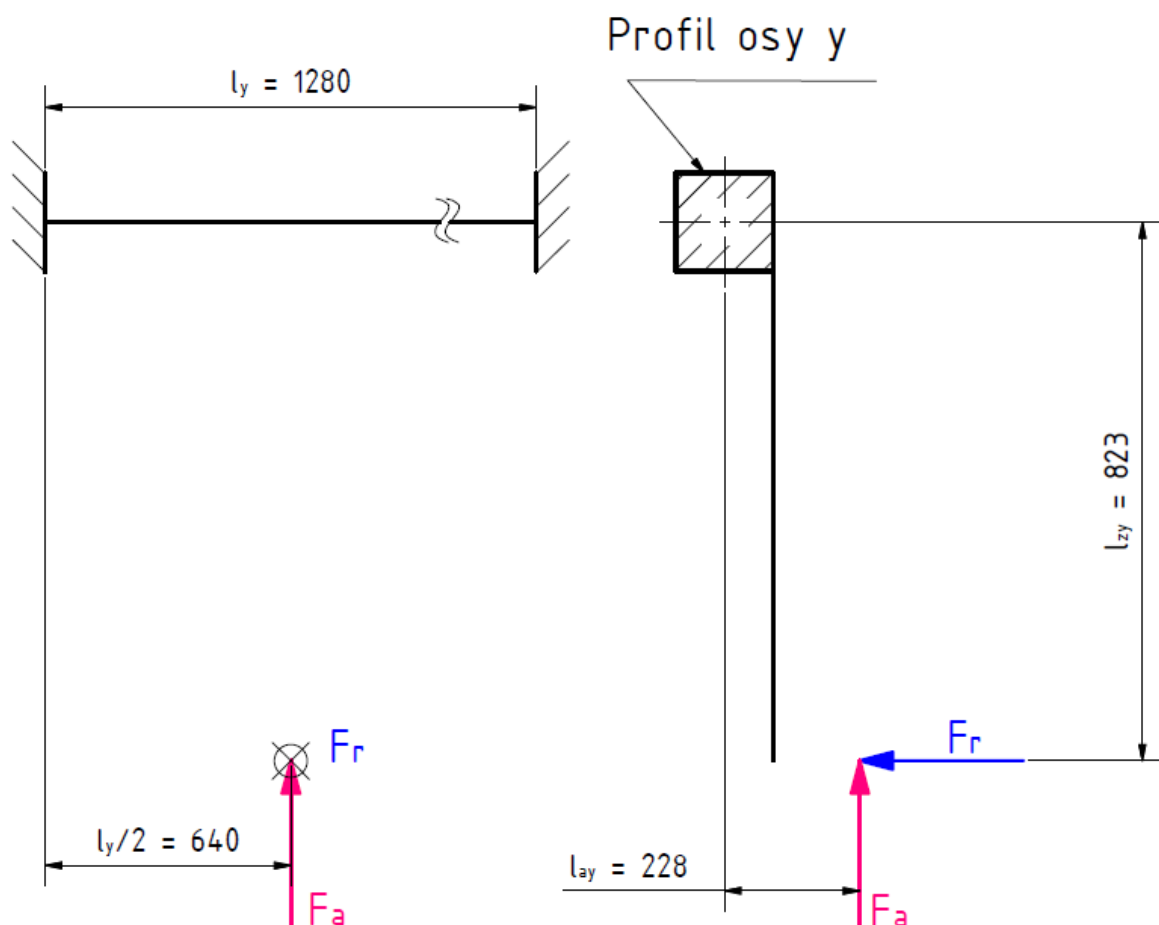
Působení sil na profil osy y jsem zjednodušeně znázornil na Obr. 7.4, podle kterého jsem následně provedl níže uvedené výpočty.

Ohybový moment od síly F_r

$$M_{OFr} = \frac{F_r \cdot l_y}{8} = \frac{31,1 \cdot 1280}{8} = 4976 \text{ Nmm} \quad (7.5)$$

Ohybový moment od síly F_a

$$M_{OFa} = \frac{F_a \cdot l_y}{8} = \frac{77,7 \cdot 1280}{8} = 12432 Nmm \quad (7.6)$$



Obr. 7.4 – schéma zatížení profilu osy y

Průhyb osy y způsobený silou F_r [9]

$$y_{OFr} = \frac{F_r \cdot l_y^3}{192 \cdot E_{Al} \cdot I} = \frac{31,1 \cdot 1280^3}{192 \cdot 70000 \cdot 187,7 \cdot 10^4} = 0,003 mm \quad (7.7)$$

Průhyb osy y způsobený silou F_a [9]

$$y_{OFa} = \frac{F_a \cdot l_y^3}{192 \cdot E_{Al} \cdot I} = \frac{77,7 \cdot 1280^3}{192 \cdot 70000 \cdot 187,7 \cdot 10^4} = 0,006 mm \quad (7.8)$$

Ohybový moment na ose y

$$M_{OY} = \sqrt{M_{OFr}^2 + M_{OFa}^2} = \sqrt{4976^2 + 12432^2} = 13391 Nmm \quad (7.9)$$

Napětí v ohybu

$$\sigma_{OY} = \frac{M_{OY}}{W_{80 \times 80}} = \frac{13391}{46920} = 0,3 MPa \quad (7.10)$$

Točivý moment

$$T_{Fr} = F_r \cdot l_{zy} - F_a \cdot l_{ay} = 31,1 \cdot 823 - 77,7 \cdot 228 = 7880 Nmm \quad (7.11)$$

Napětí v krutu

$$\tau_Y = \frac{T_{Fr}}{2 \cdot W_{80 \times 80}} = \frac{7880}{2 \cdot 46920} = 0,08 MPa \quad (7.12)$$

Úhel zkrutu [9]

$$\vartheta = \frac{180^\circ \cdot T_{Fr} \cdot l_y}{4 \cdot \pi \cdot G_{Al} \cdot I_t \cdot 10} = \frac{180^\circ \cdot 7,88 \cdot 1280}{4 \cdot \pi \cdot 25000 \cdot 136,98 \cdot 10} = 0,004^\circ \quad (7.13)$$

Posunutí nástroje

$$y_{fr} = y_{OZ} + l_{zy} \cdot tg\vartheta = 0,2 + 823 \cdot tg0,004 = 0,26 mm \quad (7.14)$$

Z důvodu velice malých deformací osy y způsobených ohybem jsem se rozhodl tyto hodnoty v určení posunutí nástroje neuvažovat.

7.3 Pevnostní kontrola hřídele otočného stolu

Hřídel otočného stolu je namáhána na krut a ohyb od působících řezných sil, jak je patrné z Obr. 6.3. Pro větší přehlednost jsem hřídel nahradil nosníkem, síly a jejich působení jsem zakreslil do schémat.

7.3.1 Výpočet reakcí na hřídeli v rovině x-z

Dle schématu Obr. 7.5 jsem pomocí rovnic rovnováhy vypočítal reakce na hřídeli v rovině x-z.

Reakce v podpoře A

$$\sum F_{iz} = 0$$

$$-F_{ah} + R_A = 0 \quad (7.15)$$

$$R_A = F_{ah} = 77,7 N \quad (7.16)$$

Reakce v podpoře C

$$\sum M_{iB} = 0$$

$$-F_{rh} \cdot (a + b) - R_{Cx} \cdot c + F_{ah} \cdot r_{Fa} = 0 \quad (7.17)$$

$$R_{Cx} = \frac{F_{ah} \cdot r_{Fa} - F_{rh} \cdot (a + b)}{c} = \frac{77,7 \cdot 209,13 - 31,1 \cdot (366,3 + 26,25)}{151,75} = 26,6N \quad (7.18)$$

Reakce v podpoře B

$$\sum F_{ix} = 0$$

$$-F_{rh} + R_{Bx} + R_{Cx} = 0 \quad (7.19)$$

$$R_{Bx} = F_{rh} - R_{Cx} = 31,1 - 26,6 = 4,5N \quad (7.20)$$

Ohybový moment na počátku hřídele

$$M_{Oph} = -F_{rh} \cdot l_{Fr} + F_{ah} \cdot r_{Fa} = -31,1 \cdot 333,8 + 77,7 \cdot 209,13 = 5868Nmm \quad (7.21)$$

Ohybový moment pod axiálním ložiskem A

$$M_{OA} = -F_{rh} \cdot a + F_{ah} \cdot r_{Fa} = -31,1 \cdot 366,3 + 77,7 \cdot 209,13 = 4857Nmm \quad (7.22)$$

Ohybový moment pod radiálním ložiskem B

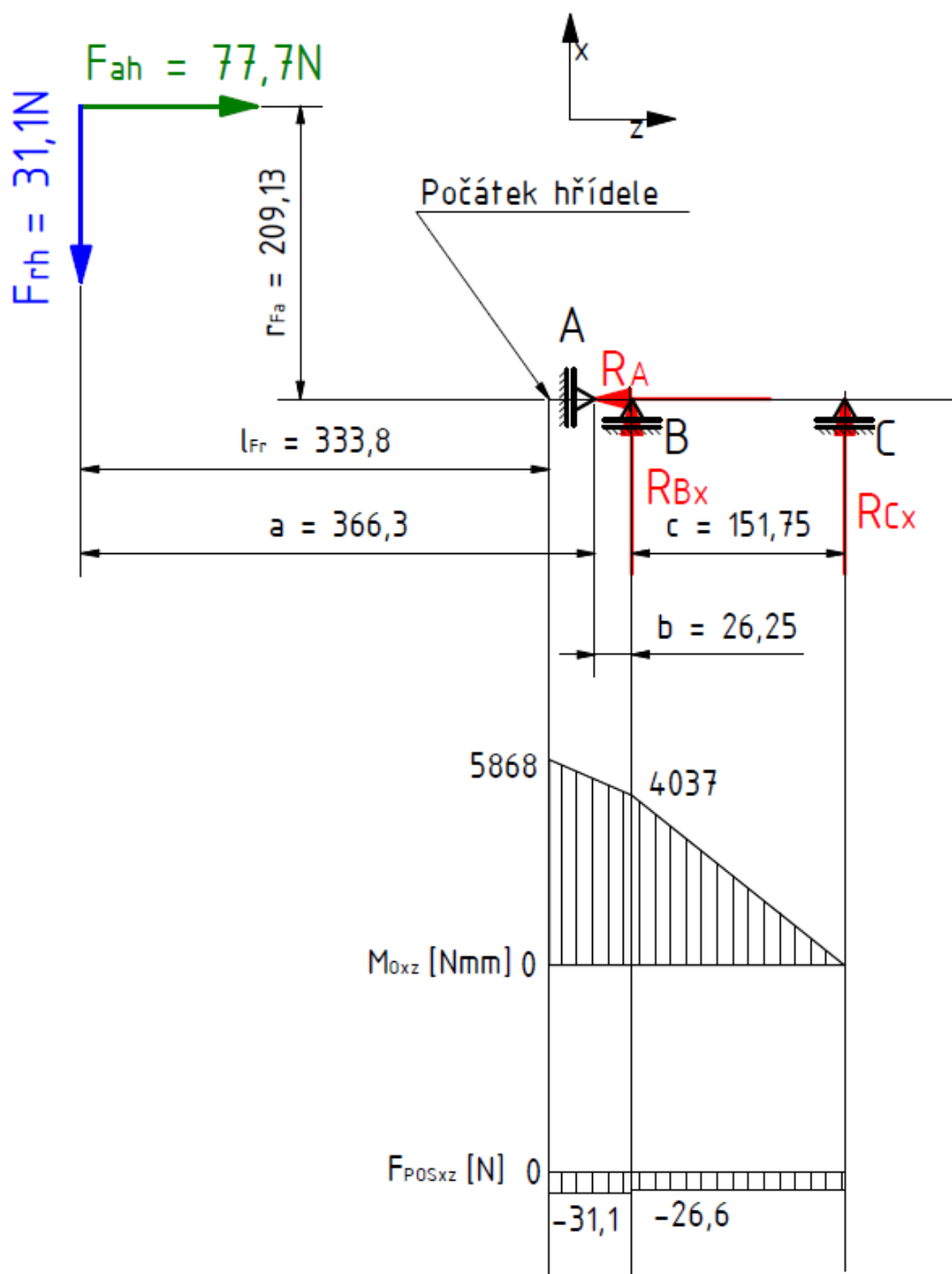
$$M_{OB} = R_{Cx} \cdot c = 26,6 \cdot 151,75 = 4037Nmm \quad (7.23)$$

Posouvající síly

$$F_{POSxzph} = -F_{rh} = -31,1N$$

$$F_{POSxzA} = -F_{rh} = -31,1N$$

$$F_{POSxzB} = -F_{rh} + R_{Bx} = -31,1 + 4,5 = -26,6N \quad (7.24)$$



Obr. 7.5 – reakce, průběhy ohybového momentu a posouvajících sil na hřídeli v rovině x-z

7.3.2 výpočet reakcí v rovině y-z

Reakce v podpoře C

$$\sum M_{iB} = 0$$

$$-F_{zh} \cdot (a + b) + R_{Cy} \cdot c = 0$$

(7.25)

$$R_{Cy} = \frac{F_{zh} \cdot (a + b)}{c} = \frac{77,7 \cdot (366,3 + 26,25)}{151,75} = 201N \quad (7.26)$$

Reakce v podpoře B

$$\sum F_{iy} = 0$$

$$-F_{zh} + R_{By} - R_{Cy} = 0 \quad (7.27)$$

$$R_{By} = R_{Cy} + F_{zh} = 201 + 77,7 = 278,7N \quad (7.28)$$

Ohybový moment na počátku hřídele

$$M_{Oph} = -F_{zh} \cdot l_{Fr} = -77,7 \cdot 333,8 = -25936Nmm \quad (7.29)$$

Ohybový moment v místě podpory A

$$M_{OA} = -F_{zh} \cdot a = -77,7 \cdot 366,3 = -28462Nmm \quad (7.30)$$

Ohybový moment v místě podpory B

$$M_{OB} = -R_{Cy} \cdot c = -201 \cdot 151,75 = -30502Nmm \quad (7.31)$$

Posouvající síly

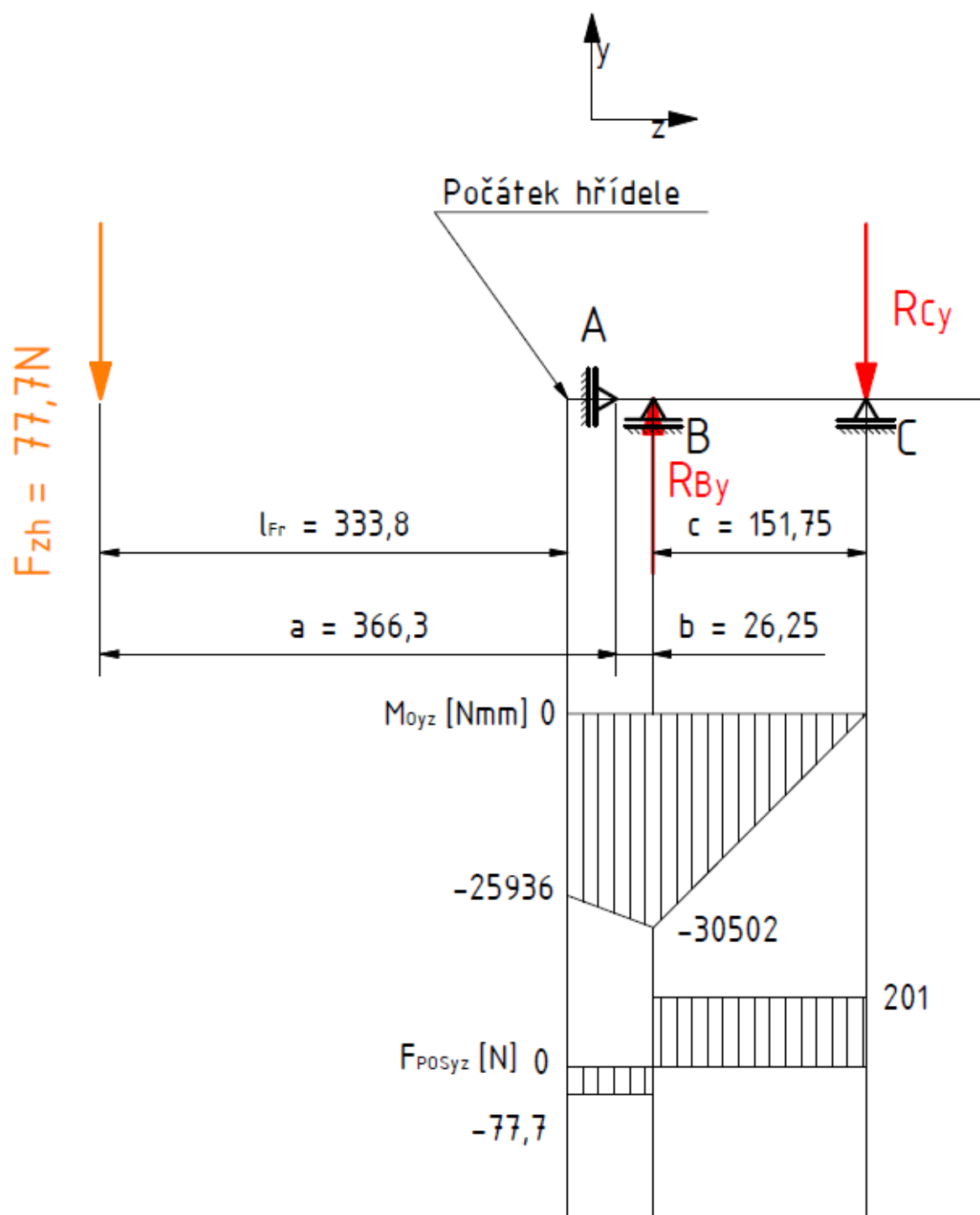
$$F_{POSyzph} = -F_{zh} = -77,7N$$

$$F_{POSyzA} = -F_{zh} = -77,7N$$

$$F_{POSyzB} = -F_{zh} + R_{By} = -77,7 + 278,7 = 201N \quad (7.32)$$

Točivý moment

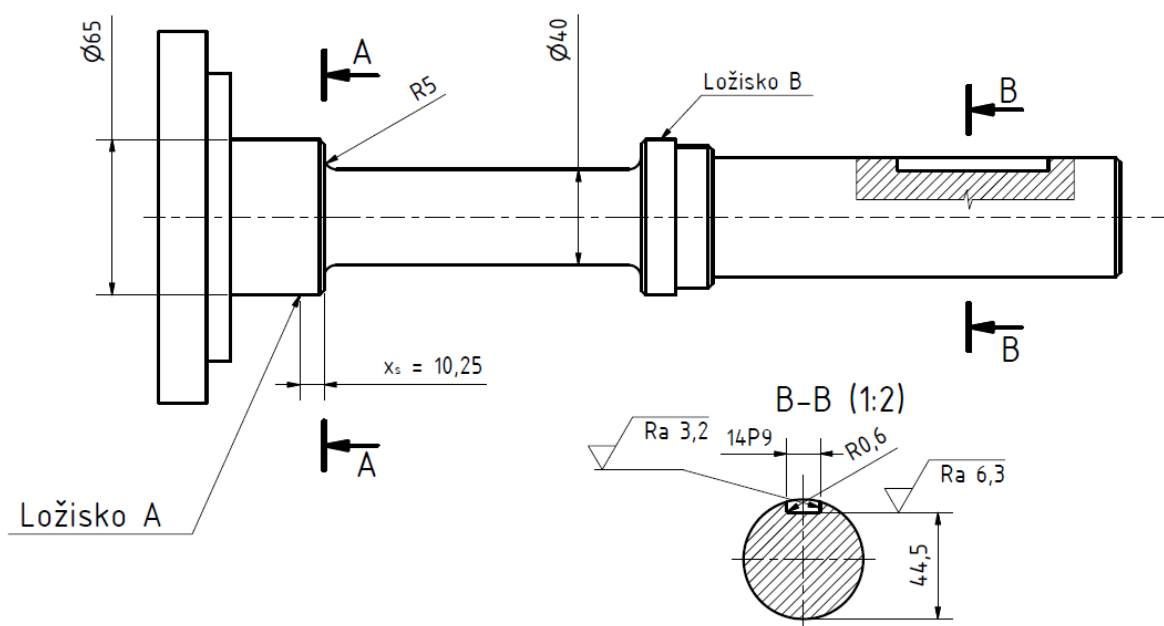
$$T_h = F_{zh} \cdot r_{Fa} = 77,7 \cdot 209,13 = 16249Nmm \quad (7.33)$$



Obr. 7.6 – reakce, průběhy ohybového momentu a posouvajících sil na hřídeli v rovině y-z

7.3.3 Statická kontrola hřídele

Pro statickou kontrolu jsem vybral dva průřezy, ve kterých je vysoké namáhání a velký vrub. Je to osazení u radiálního ložiska B, které je namáháno krutem a ohybem a průřez v místě drážky pro těsné pero, který je namáhán krutem. Hřídel a kontrolovaná místa jsou na Obr. 7.7.



Obr. 7.7 – vybrané průřezy hřídele pro statickou kontrolu

Hřídel je vyroben z oceli 11 500, jejíž mez kluzu je dle [2] $R_{e11500} = 245 \text{ MPa}$ a mez pevnosti $R_{m11500} = 500 \text{ MPa}$.

Podle [3] jsem z níže vypočítaných rozměrových parametrů jednotlivých veličin určil tvarové součinitele pro ohyb a krut a hodnoty jsem zapsal do Tab. 7.1.

Tab. 7.1 – součinitele vrubové citlivosti

Průřez	t/d [-]	D/d [-]	R/d [-]	b/d [-]	α_σ [-]	α_τ [-]
A-A	-	1,625	0,125	-	1,5	1,3
B-B	0,11	-	0,012	0,28	-	2,5

Ve výpočtech dále též uvažuji s koeficientem nerovnoměrnosti zatížení K_A dle [4], který zohledňuje riziko vzniku rázů a dalších účinků, které mají negativní charakter.

$$K_A = 1,5$$

Ohybový moment v průřezu A-A

$$M_{OAA} = K_A \cdot \sqrt{M_{OAAxz}^2 + M_{OAAyz}^2} \quad (7.34)$$

Kde M_{OAAxz} a M_{OAAyz} jsou složky ohybového momentu v jednotlivých rovinách

$$M_{OAAxz} = -F_{rh} \cdot (a + b + x_s) + F_{ah} \cdot r_{Fa} + R_{Bx} \cdot x_s = \quad (7.35)$$

$$= -31,1 \cdot (366,3 + 26,25 + 10,25) + 77,7 \cdot 209,13 + 4,5 \cdot 10,25 = 3768 Nmm$$

$$M_{OAAyz} = -F_{zh} \cdot (a + b + x_s) + R_{By} \cdot x_s = \quad (7.36)$$

$$-77,7 \cdot (366,3 + 26,25 + 10,25) + 278,7 \cdot 10,25 = -28441 Nmm$$

$$M_{OAA} = 1,5 \cdot \sqrt{3768^2 + (-28441)^2} = 43034 Nmm \quad (7.37)$$

Napětí v ohybu v průřezu A-A

$$\sigma_{OAA} = \alpha_{\sigma AA} \cdot \frac{M_{OAA}}{\pi \cdot \frac{d_{AA}^3}{32}} = 1,5 \cdot \frac{43034 \cdot 32}{\pi \cdot 40^3} = 6,9 MPa \quad (7.38)$$

Točivý moment v průřezu A-A

$$T_{hAA} = K_A \cdot F_{zh} \cdot r_{Fa} = 1,5 \cdot 77,7 \cdot 209,13 = 24374 Nmm \quad (7.39)$$

Napětí v krutu v průřezu A-A

$$\tau_{AA} = \alpha_{\tau AA} \cdot \frac{T_{hAA}}{\pi \cdot \frac{d_{AA}^3}{16}} = 1,3 \cdot \frac{24374 \cdot 16}{\pi \cdot 40^3} = 2,5 MPa \quad (7.40)$$

Redukované napětí v průřezu A-A

$$\sigma_{redAA} = \sqrt{\sigma_{OAA}^2 + 3 \cdot \tau_{AA}^2} = \sqrt{6,9^2 + 3 \cdot 2,5^2} = 8,1 MPa \quad (7.41)$$

Statická bezpečnost průřezu A-A

$$k_{sAA} = \frac{R_{e11500}}{\sigma_{redAA}} = \frac{245}{8,1} = 30,2 \quad (7.42)$$

V průřezu B-B působí pouze točivý moment zapříčiněný obráběcími silami. Statickou kontrolu průřezu B-B jsem tedy provedl pouze na namáhání krutem.

Točivý moment v průřezu B-B

$$T_{hBB} = T_{hAA} = 24374 \text{ Nmm}$$

Napětí v krutu v průřezu B-B

$$\tau_{BB} = \alpha_{\tau BB} \cdot \frac{T_{hBB}}{\pi \cdot \frac{d_{BB}^3}{16}} = 2,5 \cdot \frac{24374 \cdot 16}{\pi \cdot 44,5^3} = 3,5 \text{ MPa} \quad (7.43)$$

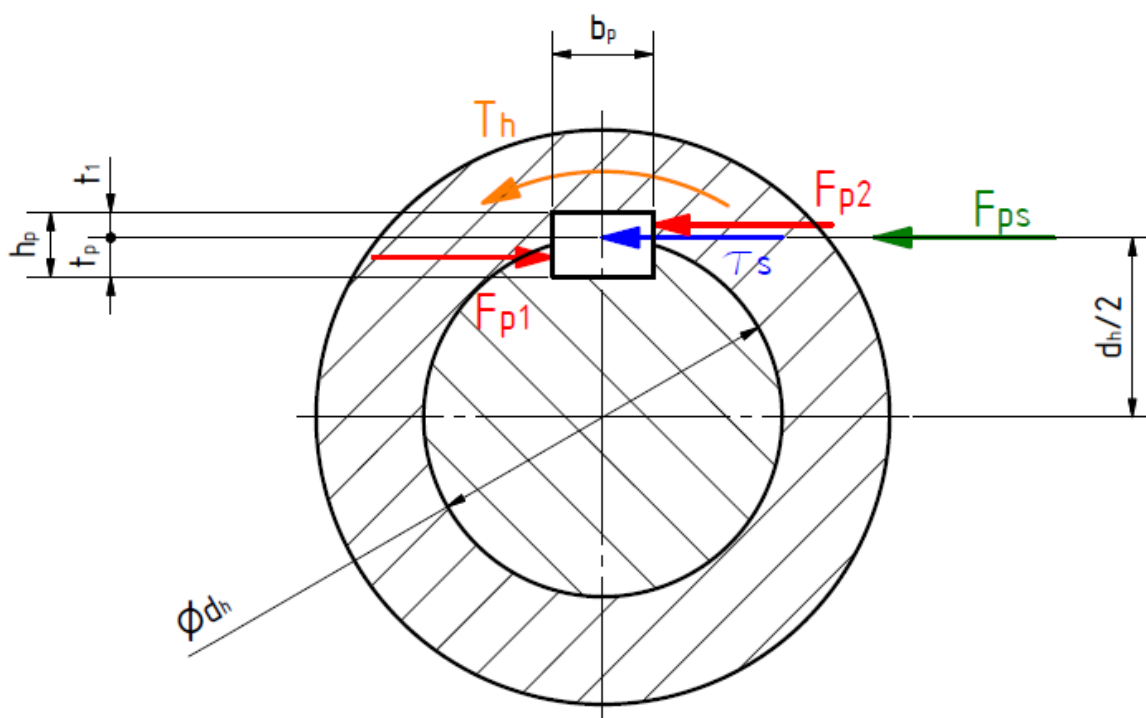
Statická bezpečnost průřezu B-B

$$k_{sBB} = \frac{0,577 \cdot R_{e11500}}{\tau_{BB}} = \frac{0,577 \cdot 245}{3,5} = 40,4 \quad (7.44)$$

Jelikož je při obrábění pracovní stůl převážně nehybný, otáčí se hlavně při nastavování obrobku do polohy a koeficienty statické bezpečnosti mají vysokou hodnotu, dynamickou kontrolu jsem u hřídele neprováděl.

7.4 Pevnostní kontrola těsného pera

Hřídel otočného stolu je vložena do duté hřídele šnekové převodovky. Přenos točivého momentu zajišťuje těsné pero. Dutá hřídel převodovky je z oceli, která má dle [5] dovolený tlak v drážce $p_{D2} = 110 \text{ MPa}$. Dovolené napětí ve stříhu je pro těsné pero dle [5] $\tau_{DS} = 30 \text{ MPa}$. Namáhání těsného pera na je Obr. 7.8.



Obr. 7.8 – síly působící na těsné pero

Jelikož se pero opírá o stěnu náboje menší plochou, provedl jsem kontrolu na otláčení vzhledem k této ploše.

Tlaková síla na bok drážky náboje

$$F_{p2} = \frac{T_h}{\frac{d_h}{2} + \frac{t_1}{2}} = \frac{24374}{\frac{50}{2} + \frac{3,5}{2}} = 911N \quad (7.45)$$

Tlak na bok drážky náboje

$$p_2 = \frac{F_{p2}}{(l_p - b_p) \cdot t_1} = \frac{911}{(63 - 14) \cdot 3,5} = 5,3MPa \quad (7.46)$$

Bezpečnost proti otláčení

$$k_{pp} = \frac{p_{D2}}{p_2} = \frac{110}{5,3} = 20,8 \quad (7.47)$$

Smykové napětí

$$\tau_{sp} = \frac{F_{ps}}{l_p \cdot b_p} = \frac{\frac{T_h}{2}}{l_p \cdot b_p} = \frac{\frac{24374}{2}}{63 \cdot 14} = 1,1MPa \quad (7.48)$$

Bezpečnost ve stříhu

$$k_{\tau p} = \frac{\tau_{Ds}}{\tau_{sp}} = \frac{30}{1,1} = 27,3 \quad (7.49)$$

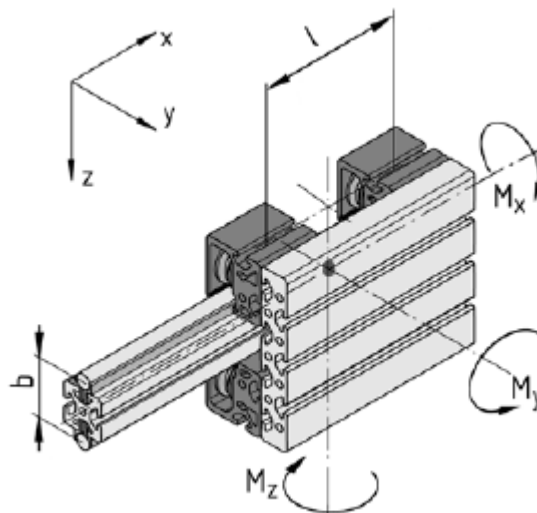
Navržené těsné pero vyhovuje na otláčení i na stříh s vysokou bezpečností. Tato vysoká bezpečnost je dána poměrně velkým poměrem mezi velikostí namáhání a průměrem hřídele, který ale nešlo zmenšit z důvodu daného průměru duté hřídele šnekové převodovky.

7.5 Kontrola pojezdového vozíku osy x

Dle [9] jsou dovolené momenty působící v jednotlivých osách na pojezdový vozík uvedeny v Tab. 7.2, která je doplněna Obr. 7.9, na kterém jsou znázorněny rozměrové vlastnosti a směry os. Použité vozíky jsou určeny pro pojezdové kulatiny řady 8 a průměru 14mm.

Tab. 7.2 – dovolené momenty na pojezdový vozík

Vozík	M_x [Nm]	M_y [Nm]	M_z [Nm]
8 D14	44,8	120	80

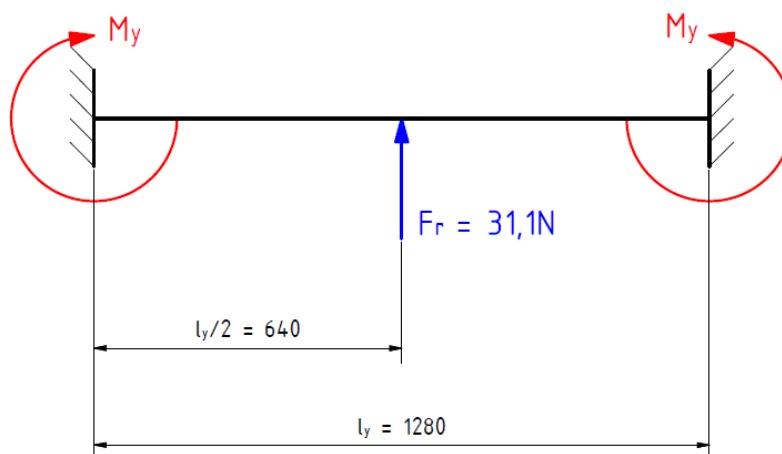


Obr. 7.9 – schéma namáhání pojezdového vozíku momenty [9]

Vozík je namáhán momentem od radiální řezné síly F_r . Nastávají zde dvě situace a to při frézování do strany nebo při frézování směrem dozadu.

7.5.1 Frézování do strany

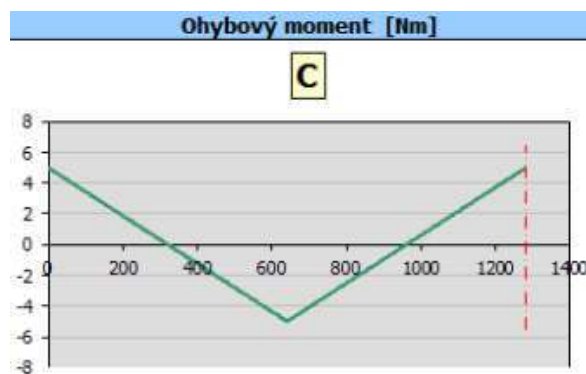
Při obrábění do strany bude vozík aretován, aby byla zajištěna požadovaná poloha v ose x. Radiální řezná síla zde vytváří moment M_y . Profil osy y je uložen na dvou vozících osy x. Pro zjednodušení jsem případ znázornil nosníkem Obr. 7.10.



Obr. 7.10 – namáhání vozíků osy x při frézování do strany

Jelikož je profil osy y uložen ve vozících pevně, uvažuji jej za vetknutý. K určení momentů M_y jsem použil program MITCalc, ze kterého jsem zjistil průběh ohybového momentu, Obr. 7.11 a jeho velikost v místě vozíku.

$$M_y = 4,98 Nm$$



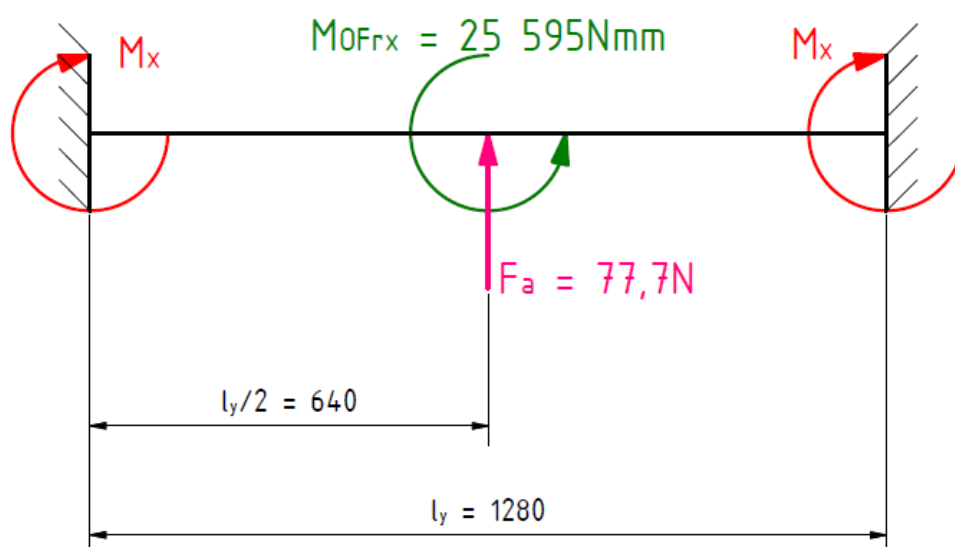
Obr. 7.11 – průběh ohybového momentu v profilu osy y

Zároveň při tomto druhu obrábění vzniká v profilu točivý moment uvedený výše ve vztahu (7.11) T_{Fr} , který se projevuje jako M_z .

$$T_{Fr} = M_z = 7,88 Nm$$

7.5.2 Frézování směrem dozadu

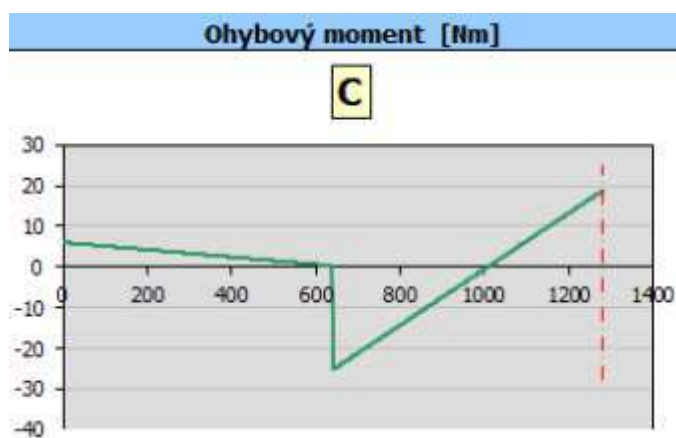
Při frézování směrem dozadu vzniká moment M_x , který je zapříčiněn kombinací účinků od sil F_a a F_r . Namáhání profilu osy y a tím i vozíků osy x jsem znázornil na Obr. 7.12.



Obr. 7.12 – namáhání vozíků osy x při frézování směrem dozadu

Moment M_x jsem zjistil pomocí programu MITCalc. Průběh ohybového momentu nosníkem je na Obr. 7.13.

$$M_x = 18,79 Nm$$

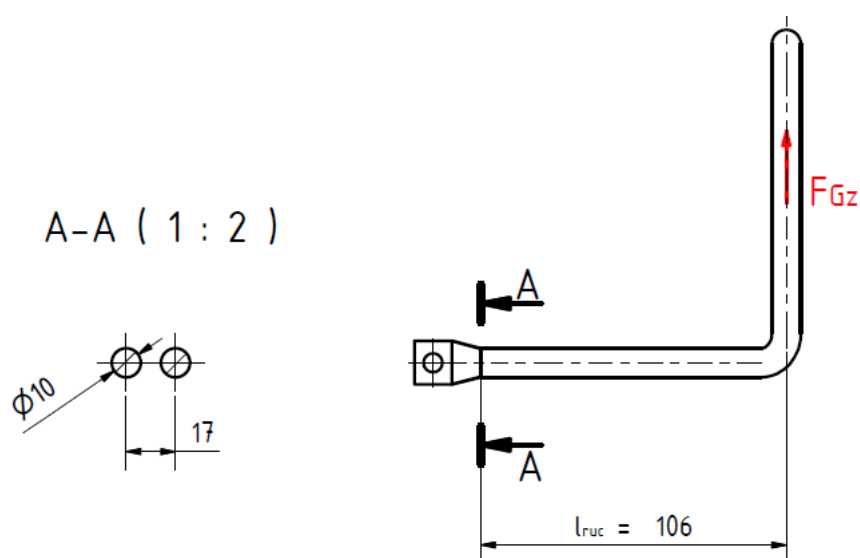


Obr. 7.13 – průběh ohybového momentu nosníkem osy y při frézování směrem dozadu

Použité pojezdové vozíky vyhovují požadavkům výrobce kladek uvedeným v [9]. Lze tedy předpokládat, že jsou navrženy správně.

7.5 Pevnostní kontrola rukojeti

Hmotnost osy z je $m_z = 10,651 kg$. Při manipulaci s osou z je nutné překonat tíhovou sílu F_{Gz} vzniklou od hmotnosti osy z skrze rukojeť. Takto je rukojeť namáhána na ohyb. Situace je znázorněna na Obr. 7.14.



Obr. 7. 14 – namáhání rukojeti

Nejvíce je rukojeť namáhána v místě přechodu z kruhového průřezu na obdélníkový, skrze který je připojena k tělesu držáku brusky šroubovým spojem. V tomto průřezu vznikne ohybový moment M_{ORAA} .

Tíhová síla osy z

$$F_{Gz} = m_z \cdot g = 10,651 \cdot 9,81 = 104,5N \quad (7.50)$$

Ohybový moment v průřezu A-A

$$M_{ORAA} = F_{Gz} \cdot l_{ruc} = 104,5 \cdot 106 = 11077Nmm \quad (7.51)$$

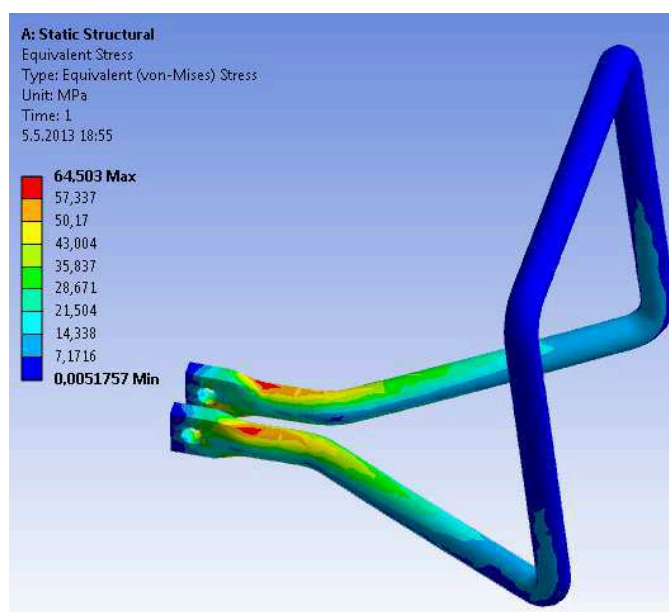
Napětí v ohybu

$$\sigma_{ORAA} = \frac{M_{ORAA}}{2 \cdot \frac{\pi \cdot d_{ruc}^3}{32}} = \frac{32 \cdot 11077}{2 \cdot \pi \cdot 10^3} = 56,4MPa \quad (7.52)$$

Materiál rukojeti je ocel 11 343 s mezí kluzu dle[2] $R_{e11343} = 180MPa$. Součinitel statické bezpečnosti rukojeti v ohybu tedy bude:

$$k_{sruc} = \frac{R_{e11343}}{\sigma_{ORAA}} = \frac{180}{56,4} = 3,2 \quad (7.53)$$

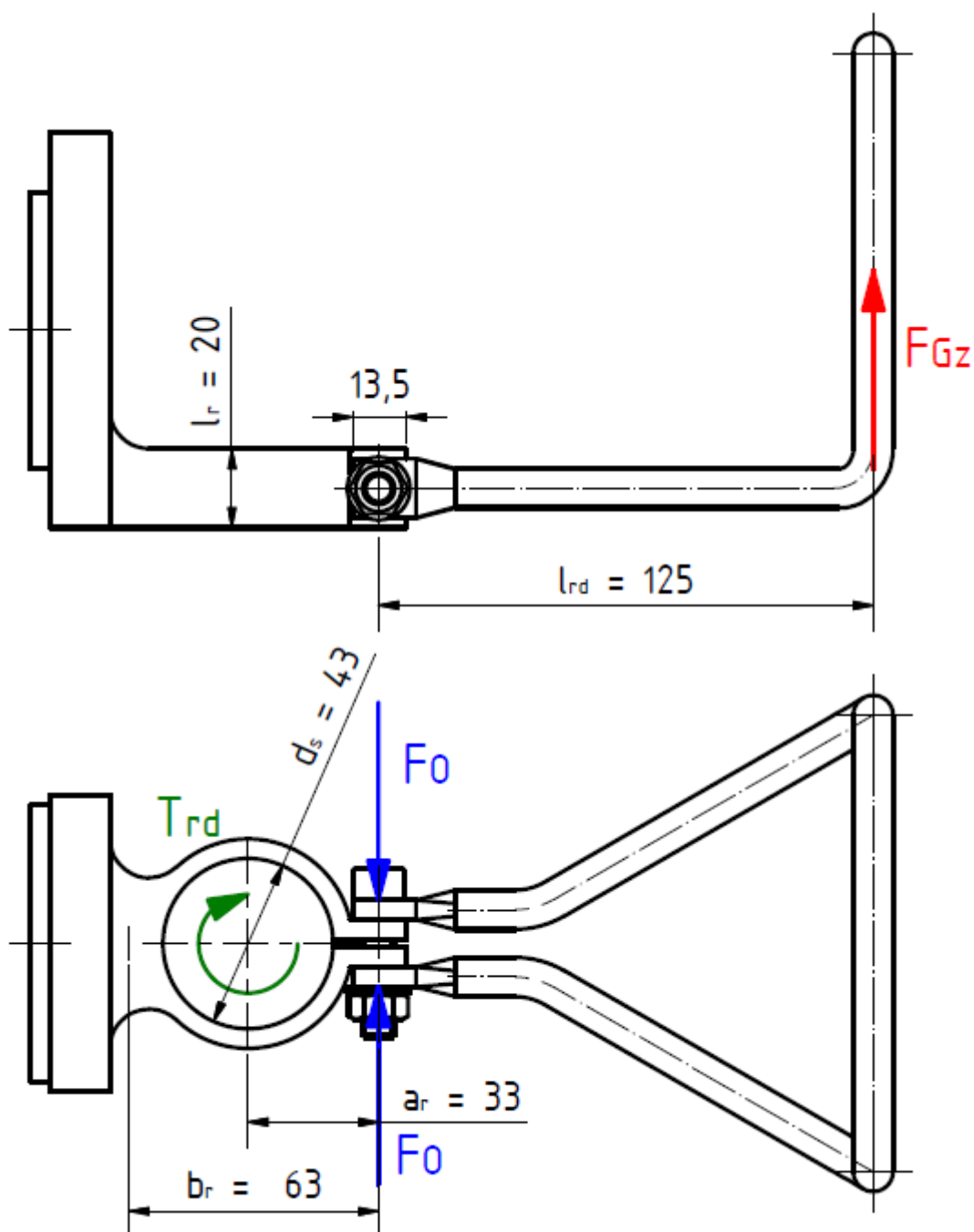
Pevnostní kontrolu jsem porovnal s MKP výpočtem pomocí programu Ansys Workbench 13, kde vyšla hodnota napětí 64,5MPa, což se dá použít jako směrodatná hodnota, jelikož odchylka od analyticky vypočtené hodnoty je malá. Výstup z MKP je na Obr. 7.15.



Obr. 7.15 – napětí na rukojeti

7.6 Návrh svěrného spoje brusky

Obvodová řezná síla F_z vytváří na poloměru nástroje točivý moment T_{rd} , který se snaží otočit bruskou v držáku. Síla F_{Gz} od manipulace s osou z, vytváří moment, který je překonáván třením ve šroubovém spojení. Šroubový spoj tedy zajišťuje dvě funkce, jednak vytváří třecí moment ve svěrném spojení brusky s držákem a také překonává moment od síly F_{Gz} . Situaci jsem znázornil na Obr. 7.16.



Obr. 7.16 – schéma svěrného spojení brusky s držákem

Nejvyšší točivý moment T_{rd} vznikne při frézování měkkého dřeva nástrojem o nejvyšším možném poloměru, tedy $d_n = 14\text{mm}$. Materiál držáku brusky je ocel, bruska má hliníkové tělo vřetena. Součinitel tření mezi ocelí a hliníkem dle [16] $f_{ao} = 0,61$. Součinitel bezpečnosti proti prokluzu volím $k_{ao} = 1,4$.

Točivý moment od brusky

$$T_{rd} = F_z \cdot \frac{d_n}{2} = 51,8 \cdot \frac{14}{2} = 362,6\text{Nmm} \quad (7.54)$$

Normálová přitlačná síla dle [5]

$$N_{rd} = \frac{2 \cdot k_{ao} \cdot T_{rd}}{\pi \cdot f_{ao} \cdot d_s} \quad (7.55)$$

Osová síla ve šroubu [5]

$$F'_o = \frac{N_{rd} \cdot a_r}{b_r} \quad (7.56)$$

Po úpravě

$$F'_o = \frac{2 \cdot k_{ao} \cdot T_{rd} \cdot a_r}{\pi \cdot f_{ao} \cdot d_s \cdot b_r} = \frac{2 \cdot 1,4 \cdot 362,6 \cdot 33}{\pi \cdot 0,61 \cdot 43 \cdot 63} = 6,5\text{N} \quad (7.57)$$

Ke stanovení třecího poloměru ve šroubovém spoji uvažuji šířku společné stykové plochy $b_{sp} = 13,5\text{mm}$ a vnitřní průměr podložky $D_2 = 9\text{mm}$ pro šroub M8. Součinitel smykového tření ocel na ocel dle [6] $f_o = 0,13$, počet třecích ploch $i = 2$.

Třecí poloměr

$$R_{Truk} = \frac{b_{sp} + D_2}{4} = \frac{13,5 + 9}{4} = 5,6\text{mm} \quad (7.58)$$

Potřebná osová síla ve šroubu dle [7]

$$F_o = \frac{k_{ao} \cdot F_{Gz} \cdot l_{rd}}{i \cdot R_{Truk} \cdot f_o} = \frac{1,4 \cdot 104,5 \cdot 125}{2 \cdot 5,6 \cdot 0,13} = 12560\text{N} \quad (7.59)$$

V dalších výpočtech uvažuji vyšší sílu F_o , jelikož síla F'_o by nepostačovala k přenesení momentu od manipulace s osou z. Dále jsem provedl kontrolu na měrný tlak ve svěrném spoji a pevnostní kontrolu šroubu.

7.6.1 Kontrola částí svěrného spoje na měrný tlak

Normálová síla

$$N_{rds} = \frac{F_o \cdot b_r}{a_r} = \frac{12560 \cdot 63}{33} = 23978N \quad (7.60)$$

Měrný tlak ve svěrném spoji

$$p_s = \frac{N_{rds}}{d_s \cdot l_r} = \frac{23978}{43 \cdot 20} = 27,9MPa \quad (7.61)$$

Dovolený měrný tlak pro hliník je dle [8] $p_{Dal} = 35MPa$, svěrný spoj je tedy z hlediska otlačení bezpečný.

7.6.2 Pevnostní kontrola šroubu

Dle [2] jsem rozměry použitého šroubu M8 zapsal do Tab. 7.3, materiál šroubu je pevnostní řady 12.9, součinitel tření v závitech volím dle [5] $f_z = 0,3$. Průměr hlavy šroubu M8 $s_k = 13mm$

Tab. 7.3 – rozměry šroubu M8

šroub	Malý průměr d_3 [mm]	Střední průměr d_2 [mm]	Stoupání P [mm]	Průměr d_{sr} [mm]
M8	6,466	7,188	1,25	8

Úhel stoupání závitu

$$\psi = \arctg \frac{P}{\pi \cdot d_2} = \arctg \frac{1,25}{\pi \cdot 7,188} = 3,1683^\circ \quad (7.62)$$

Redukovaný třecí úhel

$$\varphi' = \arctg \frac{f_z}{\cos \frac{\alpha}{2}} = \arctg \frac{0,3}{\cos 30^\circ} = 19,1066^\circ \quad (7.63)$$

Moment tření v závitu

$$M_{TZ} = F_o \cdot tg(\psi + \varphi') \cdot \frac{d_2}{2} = 12560 \cdot tg(3,1683 + 19,1066) \cdot \frac{7,188}{2} = 18490Nmm \quad (7.64)$$

Moment tření pod maticí

$$M_{TM} = F_O \cdot f_o \cdot \frac{D_2 + s_k}{4} = 12560 \cdot 0,13 \cdot \frac{9 + 13}{4} = 8980 Nmm \quad (7.65)$$

Utahovací moment šroubu

$$M_{UT} = M_{TZ} + M_{TM} = 18490 + 8980 = 27470 Nmm \quad (7.66)$$

Napětí ve šroubu v tahu

$$\sigma_t = \frac{F_O}{\pi \cdot \frac{d_3^2}{4}} = \frac{12560}{\pi \cdot \frac{6,466^2}{4}} = 382 MPa \quad (7.67)$$

Napětí ve šroubu v krutu

$$\tau_k = \frac{M_{TZ}}{\pi \cdot \frac{d_3^3}{16}} = \frac{18490}{\pi \cdot \frac{6,466^3}{16}} = 348 MPa \quad (7.68)$$

Redukované napětí v jádře šroubu dle Guesta

$$\sigma_{redM8} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{382^2 + 4 \cdot 348^2} = 794 MPa \quad (7.69)$$

Mez kluzu materiálu 12.9

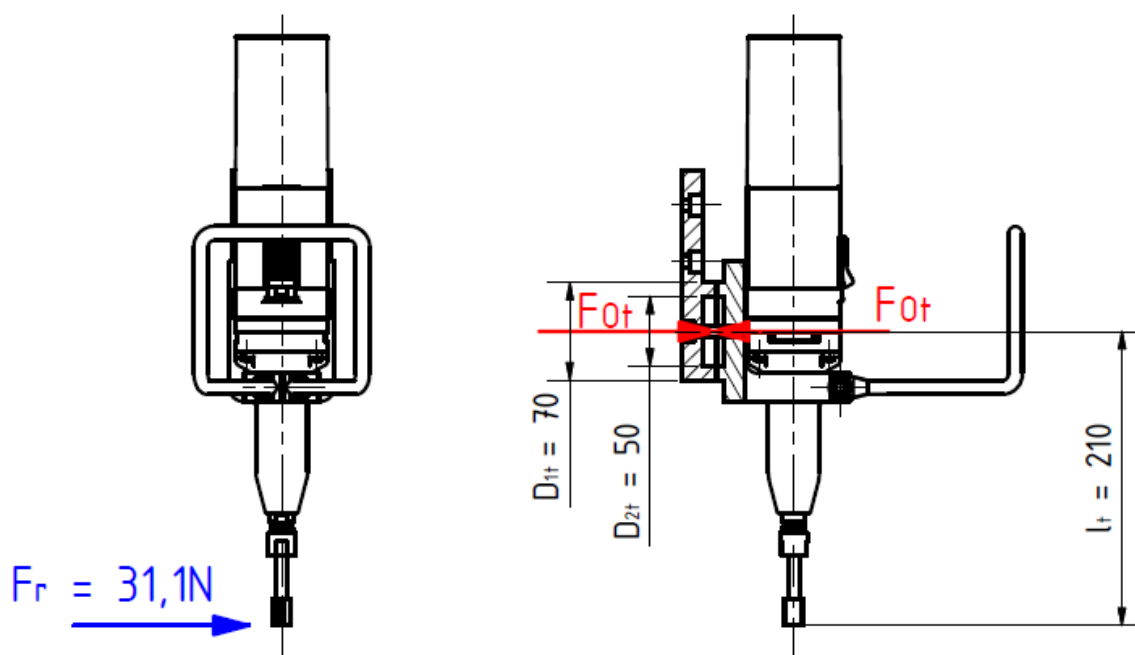
$$R_{e12.9} = 12 \cdot 9 = 1080 MPa$$

Statická bezpečnost šroubu

$$k_{sM8} = \frac{R_{e12.9}}{\sigma_{redM8}} = \frac{1080}{794} = 1,36 \quad (7.70)$$

7.7 Návrh a kontrola třecího spoje držáku brusky

Při obrábění směrem dozadu bude radiální řezná F_r síla vyvozovat moment, proti kterému působí třecí moment spoje držáku brusky k přípojnému tělesu. Navrhnul a zkontroloval jsem šroubový spoj tak, aby zajistil dostatečný třecí moment mezi spojovanými částmi a nedošlo tak k protočení osy a při obrábění. Situace je na Obr. 7.17. Materiál obou částí – držáku i přípojného tělesa je ocel 11 523 s mezí kluzu dle [2] $R_{e11523} = 333 MPa$. Bezpečnost proti prokluzu volím $k_o = 1,4$.



Obr. 7.17 – síly působící na třecí spoj držáku brusky

Moment od síly F_r

$$M_{lt} = F_r \cdot l_t = 31,1 \cdot 210 = 6531 Nmm \quad (7.71)$$

Třecí poloměr

$$R_{lt} = \frac{D_{1t} + D_{2t}}{4} = \frac{70 + 50}{4} = 30mm \quad (7.72)$$

Potřebná osová síla ve šroubu

$$F_{Ot} = \frac{k_o \cdot M_{lt}}{f_o \cdot R_{lt}} = \frac{1,4 \cdot 6531}{0,13 \cdot 30} = 2344 N \quad (7.73)$$

Tlak ve stykové ploše

$$p_{sp} = \frac{F_{Ot}}{\pi \cdot \frac{(D_{1t}^2 - D_{2t}^2)}{4}} = \frac{2344}{\pi \cdot \frac{(70^2 - 50^2)}{4}} = 1,2 MPa \quad (7.74)$$

Dovolený tlak oceli dle [8] je $p_{Do} = 120 MPa$, spoj tedy na otlačení vyhovuje.

Dle výše uvedených vzorců (7.62) – (7.68) jsem provedl pevnostní kontrolu šroubu třecího spoje a výsledky jsem zapsal do Tab. 7. 4. Šroub je z materiálu 5. 6. Mez kluzu tohoto materiálu je $R_{e5,6} = 300 MPa$.

Tab. 7.4 – síly a napětí ve šroubu třecího spoje

Osová síla F_{Ot} [N]	Moment tření v závitu M_{TZ} [Nmm]	Moment tření pod maticí M_{TM} [Nmm]	Napětí v tahu σ_t [MPa]	Napětí v krutu τ_k [MPa]	Utahovací moment M_{UT} [Nmm]
2344	3451	1676	71	65	5127

Redukované napětí podle Guesta

$$\sigma_{redM8} = \sqrt{\sigma_t^2 + 4 \cdot \tau_k^2} = \sqrt{71^2 + 4 \cdot 65^2} = 148 MPa \quad (7.75)$$

Statická bezpečnost k mezi kluzu

$$k_{sM8} = \frac{R_{e5.6}}{\sigma_{redM8}} = \frac{300}{148} = 2,03 \quad (7.76)$$

7.8 Pohon otočného stolu

Jako pohon jsem zvolil 8-mi pólový elektromotor Siemens s výkonem $P_1 = 1,5 kW$ a otáčkami $n_1 = 750 min^{-1}$ spojený se šnekovou převodovkou Simogear s převodovým poměrem $i_p = 25$ dle online konfigurátoru Siemens [17].

8 CENOVÝ ODHAD

Na základě cen z e-shopů strojních dílů [20], [21], [22], [23], [24], [25] a poptávek u distributorů jsem stanovil přibližný cenový odhad navrženého zařízení. Cenu vyráběných dílů jsem odhadnul, stejně jako cenu šnekové převodovky, kterou jsem určil pouze přibližně pomocí podobné převodovky, která měla cenu uvedenou v e-shopu. Hodnoty jsem zapsal do Tab. 8.1 a provedl jsem výpočet celkové sumy.

Tab. 8.1 – cenový odhad navrženého stroje

Položka	cena bez DPH [Kč]	cena s DPH [Kč]
konstrukční profily, spojovací materiál profilů, pojezdové vozíky, pojezdové tyče a jejich držáky, příslušenství	68 824,13	83 277,30
Bruska Narex EBD 30-8E	4 902	5 931
Elektromotor Siemens 1LA7, 1,5kW	6 499,44	7 864,32
Šneková převodovka	20 655	24 992,55
radiální ložiska 16 013	515	623,2
axiální ložisko 81 124 - 120 x 155 x 155	4 944,63	5 983
matice KM 12	34,71	42
podložka MB 12	8,26	10
těsné pero 14e7 x 9 x 63	116,64	141,13
pojistný kroužek pro díry 100	180,41	218,3
spojovací materiál - šrouby, matice, podložky	180,44	218,33
hřídel	1157,02	1400
deska stolu	2892,56	3500
držák brusky	702,48	850
rukojeť	206,61	250
přechodové těleso	578,5	700
celkem	112 397,83	136 001,13

9 ZÁVĚR

V první části práce jsem provedl průzkum současného stavu strojů a nástrojů pro frézování dřeva a porovnal jednotlivé stroje a nástroje mezi sebou.

Dle zadaných požadavků jsem provedl konstrukční návrh souřadnicové frézky na dřevo s ručním pohonem souřadnicových os. Rám stroje a pohyblivé části jednotlivých os jsem navrhl z hliníkového stavebnicového systému, který je vhodný pro stavbu velkého množství strojních zařízení různého druhu. Jako vřeteno jsem použil přímou brusku Narex EBD 30-8 E a podle online konfigurátoru jsem navrhl pohon otočného stolu, a to 8-mi pólový elektromotor Siemens s výkonem $P_1 = 1,5\text{kW}$ a otáčkami $n_1 = 750\text{min}^{-1}$ se šnekovou převodovkou s převodovým poměrem $i_p = 25$. Tím jsem dosáhl požadované rychlosti otáčení pracovního stolu.

Dále jsem určil řezné podmínky pro dva druhy dřeva s ohledem na rozsah otáček vřetena. Z řezných podmínek a materiálových vlastností zvolených druhů dřev jsem vypočítal síly, které vzniknou při obrábění a způsobují namáhání jednotlivých částí stroje.

Pevnostně jsem zkontroloval důležité části stroje, které jsou namáhány obráběcími silami. Všechny kontrolované části pevnostní kontrole vyhověly a navrženou koncepci lze považovat za vyhovující. Deformace profilů souřadnicových os způsobené obráběcími silami jsou nízké.

V poslední části jsem provedl přibližný cenový odhad navrženého stroje, kdy cena použitých dílů činí 136 001,13 Kč s DPH.

V diplomové práci jsem dodržel všechny podmínky zadání a stanovené cíle. Díky použití stavebnicového systému hliníkových profilů jsem si osvojil způsob konstruování s jejich použitím, které je jednoduché a efektivní.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] NĚMEC, Dobroslav; a kolektiv. *Strojírenská technologie 3, strojní obrábění*. 2. vyd. Praha: SNTL, 1982. 320 s. DT 621.9.042 (075.3).
- [2] LEINVEBER, Jan; VÁVRA, Pavel. *Strojnické tabulky*. 4. vyd. Úvaly: ALBRA, 2008. 914 s. ISBN 978-80-7361-051-7.
- [3] BOHÁČEK, František; a kolektiv. *Části a mechanismy strojů II, hřídele, tribologie, ložiska*. 1. vyd. Brno: VUT, 214 s. ISBN 55-565-83.
- [4] MORAVEC, Vladimír; HAVLÍK, Jiří. *Výpočty a konstrukce strojních dílů*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2005. 72 s. ISBN 80-248-0878-1.
- [5] KALÁB, Květoslav. *Části a mechanismy strojů pro bakaláře, části spojovací*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2009. 91 s. ISBN 978-80-548-1290-8.
- [6] FOJTEK, Alois; FOUKAL, Jaroslav. *Tabulky vybraných fyzikálních a technických veličin*. 1. vyd. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 1992. 115 s. ISBN 80-7078-149-1.
- [7] BOLEK, Alfred; KOCHMAN, Josef; a kolektiv. *Části strojů 1*. 5. vyd. Praha: SNTL, 1989. 776 s. ISBN 80-03-00046-7
- [8] KALÁB, Květoslav. *Návrh, výpočet a montáž řemenového převodu* [online]. [cit. 2013-05-07]. URL: <<http://www.347.vsb.cz/files/kal01/prirucka-remen.pdf>>.
- [9] ITEM: *Stavebnicový systém MB* [online]. [cit. 2013-05-07]. URL: <http://www.haberkorn.cz/files/file/system-hlinikovych-profilu/ke-stazeni/MB7_CZ.pdf>.
- [10] NAREX: *Původní návod k používání* [online]. [cit. 2013-05-07]. URL: <<http://narex.cz/RetrieveFile.aspx?File=403&Name=N%u00e1vod+k+pou%u017e%u00edv%u00e1n%u00ed+-+EBD+30-8%3b+EBD+30-8+E%3b+EBK+30-8+E>>
- [11] HOUFEK: *Woodworking machines* [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.houfek.com/>>.
- [12] DOBRÉ STROJE: *Dřevoobráběcí stroje a nástroje pro řemeslníky* [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.dobrestroje.cz>>
- [13] DREVO-NASTROJE.CZ: *Prodej nástrojů pro obrábění dřeva* [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.drevo-nastroje.cz/>>.
- [14] HB TECHNIK: [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.hbtech.cz/>>.

- [15] UNI-MAX.CZ: [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.uni-max.cz/>>.
- [16] THE ENGINEERING TOOLBOX: *Friction nad Coefficients of Friction* [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <http://www.engineeringtoolbox.com/friction-coefficients-d_778.html>.
- [17] SIEMENS: *Geared motors* [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<https://eb.automation.siemens.com/mall/en/ww/catalog/products/10045144>>.
- [18] MGR. JAN HAMERNÍK: *Základy obrábění* [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>>.
- [19] PEVNOST DŘEVA: [online]. [cit. 2013-03-20]. URL: <<http://wood.mendelu.cz/cz/sections/Props/?q=node/56>>
- [20] E-SHOP LOŽISKA: [online]. [cit. 2013-05-07]. URL: <<http://www.eshop-loziska.cz/>>.
- [21] LOŽISKÁRNA: [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.loziska.net>>.
- [22] KASA.CZ: [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.kasa.cz>>.
- [23] AKROS: [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.akros.cz>>.
- [24] KVELB: [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.elektromotory.cz>>
- [25] AB ELEKTROPOHONY: [online]. [cit 2013-05-07]. URL: <<http://www.abelektropohony.cz>>

SEZNAM POUŽITÉHO SOFTWARE

Autodesk Inventor 2013

MITCalc 1.61

Ansys Workbench 13

PODĚKOVÁNÍ

Závěrem děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Jiřímu Havlíkovi, Ph.D. za cenné rady, poskytnuté materiály a ochotné vedení.

SEZNAM PŘÍLOH

Výkres sestavy HAV415_DP_00

Výrobní výkres hřídele HAV415_DP_07.1

Elektronická verze diplomové práce na CD